

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Martina Radoš

Zagreb, 2016.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor rada:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Martina Radoš

Zagreb, 2016.

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradila samostalno, koristeći se znanjem stečenim na Fakultetu, kao i navedenom literaturom.

ZAHVALA

Ovaj rad je izrađen pod stručnim vodstvom prof. dr. sc. Zorana Kožuha. Ovim putem mu se zahvaljujem na pruženoj podršci i korisnim savjetima tijekom izrade ovog završnog rada. Zahvaljujem se dr. sc. Maji Jurici na vođenju tijekom izrade završnog rada te na korisnim savjetima i pomoći, kako pri izradi teoretskog dijela, tako i pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se tehničkom suradniku Tomislavu Habeku te dr. sc. Ivanu Stojanoviću na ukazanoj suradnji i pomoći pri izradi ovog rada.

Najveću zahvalu dugujem svojoj obitelji, na velikoj potpori i strpljenju tijekom cijelog mog školovanja, a posebno tijekom fakultetskog obrazovanja.

SAŽETAK

U ovom radu obrađena je tema određivanja kvalitete reza postukom plazma rezanja konstrukcijskog čelika.

U uvodnom dijelu opisan je postupak plazma rezanja, njegove karakteristike, vrste, razvoj procesa kroz povijest te prednosti i nedostaci srodnih postupaka toplinskog rezanja. Opisana je i pripadajuća oprema za plazma rezanje te utjecaj brzine rezanja na kvalitetu plazma rezanja. Isto tako, u uvodu je objašnjena i norma HRN EN ISO 9013 prema kojoj se određuje kvaliteta reza.

U eksperimentalnom dijelu rada na uzorku od konstrukcijskog čelika uz primjenu navedene norme određena je kvaliteta reza. Eksperimentalni dio izveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Uzorci su rezani s različitim brzinama u vidu optimizacije brzine rezanja s obzirom na kvalitetu reza. Nakon rezanja, u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina (LFSB) izvršena su mjerenja pojedinih značajki kvalitete reza te svrstavanje u pojedine klase kvalitete reza. Na uređaju za mjerenje hrapavosti površina mjerene su različite veličine hrapavosti površine dok je tolerancija okomitosti ili kutnosti mjerena uz pomoć univerzalnog mjernog mikroskopa. Veličine hrapavosti R_z – prosječne visine neravnina te vrijednosti tolerancija okomitosti ili kutnosti klasificirane su prema normi HRN EN ISO 9013.

SUMMARY

This paper describes how to determine the quality of the cut of stainless steel made by plasma arc cutting.

The introductory part describes the process of plasma arc cutting, its characteristics, types, the development through history, as well as the advantages and disadvantages of the similar thermal cutting processes. Related equipment for plasma arc cutting is also described, and so is the impact of cutting speed on the quality of plasma arc cutting. The introductory part also explains the HRN EN ISO 9013 norm(standard) which determines the quality of the cut.

The experimental part determined the quality of the cut on the sample of structural steel with the application of the listed norm. The experimental part was carried out in the Laboratory for Welding at the Faculty of mechanical engineering and naval architecture. Samples were cut with different speeds with having in mind the optimization of cutting speed due to the quality of the cut. After cutting, in the Laboratory for Precise Measurements of Length (LFSB) were measured certain quality features of the cut and the classification of individual class quality of the cut. On the device for surface roughness measurement, were measured different magnitudes of surface roughness, while the straightness and angularity tolerance were measured with the help of a universal measuring microscope. Surface roughness magnitudes R_z , the average height of prominences, and values of straightness and angularity tolerances were classified according to the HR EN ISO 9031 norm.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 25-02-2016. Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3
Ur.broj: 15-1703-16-131

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: MARTINA RADOŠ

Mat. br.: 0035189881

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: PLAZMA REZANJE

Naslov rada na
engleskom jeziku: PLASMA CUTTING

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu rada potrebno je shodno literaturnim podacima obraditi primjenu plazma rezanja u metaloprerađivačkoj industriji. Navesti karakteristike postupka, vrste i podjelu. Usporediti postupak plazma rezanja sa srodnim postupcima toplinskog rezanja.

U eksperimentalnom dijelu rada na izrezanom uzorku od konstrukcijskog čelika uz primjenu važeće norme odrediti kvalitetu reza. Predložiti načine mogućeg poboljšanja kvalitete reza.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.

2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

SADRŽAJ

1.UVOD	1
2. PLAZMA REZANJE	2
2.1. Plazma	2
2.2. Definicija plazma rezanja	2
2.2.1. Nepreneseni luk	3
2.2.2. Preneseni luk	4
2.3. Proces plazma rezanja	5
2.3.1. Tijek postupaka plazma rezanja	8
2.3.2. Glavni parametri rezanja plazmom	12
2.3.2.1. Snaga plazme	12
2.3.2.2. Brzina rezanja	13
2.3.3. Zaštitni plinovi i plinovi za rezanje plazmom	14
2.3.3.1. Plinovi za rezanje	15
2.3.3.2. Sekundarni plinovi	16
2.3.3.3. Smjernice za izbor plina za rezanje plazmom	17
2.3.4. Debljina i smjer rezanja	18
2.3.5. Kvaliteta reza	19
2.3.6. Suvremena oprema za rezanje	21
2.3.7. Primjena postupka	23
2.3.8. Usporedba postupka plazma, plinskog i laserskog rezanja	24
2.4. Norma HR EN ISO 9013-2003	29
2.4.1. Oznake i definicije objašnjene slikama	29
2.4.2. Tolerancije okomitosti ili kutnosti	31
2.4.3. Prosječna visina neravnina	31
2.4.4. Određivanje kvalitete površine	32
2.4.5. Uvjeti mjerenja	32
2.4.5.1. Točka mjerenja	33

2.4.6. Kvaliteta površine reza	34
2.4.6.1. Rasponi mjerenja	34
3. EKSPERIMENTALNI DIO	36
3.1. Površine i njihov dodir	36
3.1.2. Definicije parametara hrapavosti	36
3.2. Oprema za rezanje	41
3.3. Materijal	43
3.4. Plan pokusa	43
3.4.1. Plazma rezanje konstrukcijskog čelika debljine 10 mm	45
3.4.1.1. Mjerenje hrapavosti površine reza konstrukcijskog čelika (debljina 10 mm)	46
3.4.1.2. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza konstrukcijskog čelika (debljina 10 mm)	52
3.4.2. Plazma rezanje konstrukcijskog čelika debljine 5 mm	53
3.4.2.1. Mjerenje hrapavosti površine reza konstrukcijskog čelika (debljina 5 mm)	55
3.4.2.2. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza konstrukcijskog čelika (debljina 5 mm)	59
4. ZAKLJUČAK	60
5. LITERATURA	61

POPIS SLIKA

Slika 1. Proces stvaranja plazme [1].....	2
Slika 2. Princip rada s neprenesenim lukom [2].....	3
Slika 3. Princip rada s prenesenim lukom [2].....	4
Slika 4. Početak plazma rezanja [3].....	5
Slika 5. Ionizacija plazmenog plina [3].....	5
Slika 6. Stvaranje glavnog luka iz pilot luka [3].....	6
Slika 7. Putanja plazmenog mlaza do radnog komada [3].....	6
Slika 8. Plazma rezanje [3].....	7
Slika 9. Konvencionalni postupak rezanja [1].....	8
Slika 10. Luk plazme s dualnim tokom [1].....	9
Slika 11. Plazma rezanje zrakom [1].....	9
Slika 12. Rezanje plazmom s vodenom zaštitom [1].....	10
Slika 13. Rezanje plazmom s ubrizgavanjem vode [1].....	10
Slika 14. Rezanje plazmom s ubrizgavanjem kisika [1].....	11
Slika 15. Izvor struje za plazma rezanje [4].....	12
Slika 16. Ovisnost brzine rezanja o debljini materijala [1].....	13
Slika 17. Prikaz različitih presjeka rezova u ovisnosti o izabranim parametrima [1].....	20
Slika 18. FF gorionici s "vrtložnim" sekundarnim plinom [1].....	21
Slika 19. Namjena postupka za pojedine materijale i njihove debljine [7].....	26
Slika 20. Prikaz točnosti primjenom toplinskih postupaka rezanja [8].....	26

Slika 21. Proces rezanja radnog komada [10].....	30
Slika 22. Radni komad po završetku rezanja [10].....	30
Slika 23. Moguće vrste rezova [10].....	31
Slika 24. Prikaz tolerancije okomitosti, vertikalni rez [10].....	31
Slika 25. Prosječna visina neravnina.....	32
Slika 26. Mjerenje hrapavosti.....	37
Slika 27. Prikaz tri karakteristične duljine [11].....	38
Slika 28. Prikaz aritmetičke sredine apsolutnih odstupanja profila (R_a) [11].....	39
Slika 29. Prikaz najveće visine profila unutar referentne duljine (R_z) [11].....	39
Slika 30. Prikaz ukupne visine profila (R_t) [11].....	40
Slika 31. Prikaz srednjeg razmaka između vrhova profila (R_{Sm}) [11].....	40
Slika 32. Izvor struje SPARCIN 900M.....	41
Slika 33. CNC sustav – stol PROXIMA KOMPAKT.....	42
Slika 34. Mjerenje hrapavosti na uzorcima.....	47
Slika 35. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila (R_a) i brzine rezanja (debljina 10 mm).....	49
Slika 36. Prikaz ovisnosti visine vrha profila (R_p) i brzine rezanja (debljina 10 mm).....	49
Slika 37. Prikaz ovisnosti najveće visine profila (R_z) i brzine rezanja (debljina 10 mm).....	50
Slika 38. Prikaz ovisnosti ukupne visine profila (R_t) i brzine rezanja (debljina 10 mm).....	50
Slika 39. Prikaz ovisnosti srednjeg koraka elementa profila (R_{Sm}) i brzine rezanja (debljina 10 mm).....	51
Slika 40. Prikaz ovisnosti maksimalne visine profila ($R_{z1\ max}$) i brzine rezanja (debljina 10 mm).....	51

Slika 41. Uređaj za mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti.....	52
Slika 42. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja (R_a) i brzine rezanja (debljina 5 mm).....	56
Slika 43. Prikaz ovisnosti najveće visine profila (R_z) i brzine rezanja (debljina 5 mm).....	57
Slika 44. Prikaz ovisnosti visine vrha profila (R_p) i brzine rezanja (debljina 5 mm).....	57
Slika 45. Prikaz ovisnosti ukupne visine profila (R_t) i brzine rezanja (debljina 5 mm).....	58
Slika 46. Prikaz ovisnosti srednjeg koraka elemenata profila (R_{Sm}) i brzine rezanja (debljina 5 mm).....	58
Slika 47. Prikaz ovisnosti maksimalne visine profila (R_{Z1max}) i brzine rezanja (debljina 5 mm).....	59

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz kvalitete reza pojedinim plazma postupcima na određenim materijalima [5]	17
Tablica 2. Kjellbergovi plazma uređaji za 3D robotizirano plazma rezanje [7]	22
Tablica 3. Prednosti i nedostaci postupka plazma, plinskog i laser rezanja [7]	24
Tablica 4. Ekonomska bilanca postupaka rezanja za čelik EN S355J0 [9]	27
Tablica 5. Precizni mjerni instrumenti [10]	32
Tablica 6. Hrapavi mjerni instrumenti [10]	32
Tablica 7. Dimenzije Δa [10]	33
Tablica 8. Rasponi tolerancija okomitosti ili kutnosti, u [10]	34
Tablica 9. Rasponi prosječnih visina neravnina, R_{z5} [10]	35
Tablica 10. Specifikacija uređaja za mjerenje hrapavosti	37
Tablica 11. Izbor granične vrijednosti filtra u ovisnosti o vrsti i vrijednosti profila [11]	38
Tablica 12. Kemijski sastav čelika S355JR	43
Tablica 13. Plan pokusa	44
Tablica 14. Parametri rezanja konstrukcijskog čelika 10 mm debljine	45
Tablica 15. Uzorci nakon rezanja (debljina 10 mm)	46
Tablica 16. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza (debljina 10 mm)	47
Tablica 17. Parametri rezanja konstrukcijskog čelika debljine 5 mm	53
Tablica 18. Uzorci nakon rezanja (debljina 5 mm)	54
Tablica 19. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza (debljina 5 mm)	55

POPIS OZNAKA

Oznaka	Veličina	Jedinica
$C_{tot,r}$	Ukupni troškovi rada	€/h
$C_{tot,p}$	Ukupni trošak plinova	€/h
$C_{tot,e}$	Ukupni trošak energije	€/h
$C_{tot,ss}$	Ukupni trošak strojnih sati	€/h
$C_{tot,s}$	Ukupni trošak savjetovanja	€/h
$C_{tot,kl}$	Ukupni trošak katode/leće	€/h
Δa	Smanjenje debljine	mm
R_{Z5}	Prosječna visina neravnina	μm
l_n	Duljina mjerenja	mm
l_r	Prosječna duljina uzorka profila hrapavosti	mm
l_t	Duljina ispitivanja	mm
n	Rezna linija	-
r	Taljivi gornji rub	-
u	Tolerancija okomitosti ili kutnosti	mm
λ_c	Granična vrijednost filtra	mm
R_{Sm}	Srednji razmak između vrhova profila	mm
R_Z	Najveća visina profila unutar referentne duljine	μm
R_a	Aritmetička sredina apsolutnih odstupanja profila hrapavosti	μm
R_p	Najveća visina vrha profila	μm
R_v	Najveća dubina dna profila	μm
R_{Z1max}	Najveća visina profila	μm
R_t	Ukupna visina profila	μm
CNC	Computer Numerical Control	

ν	Promjer sapnice	mm
X	Srednja vrijednost	μm
s	Standardna devijacija	
a	Debljina reza	mm

1.UVOD

Konstrukcijski čelici se primjenjuju kod izrade karakterističnih konstrukcijskih dijelova strojeva i uređaja. S obzirom na mehanička svojstva, konstrukcijski čelici moraju imati visoku granicu razvlačenja, dovoljnu plastičnu deformabilnost (radi izbjegavanja pojave krhkog loma), visoku granicu puzanja i čvrstoću pri povišenim temperaturama, te zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost. Najčešće služe za izradu vratila, osovina, zupčanika, nosača opruga, vijaka, poklopaca, ventila, kućišta itd. Za rezanje konstrukcijskih čelika između ostalih postupaka kao što su lasersko rezanje, plinsko rezanje, koristi se i plazma rezanje. U današnje vrijeme svakako se u prvi plan stavlja kvaliteta pojedinog postupka i ekonomičnost njegove izrade, jedno bez drugoga je nezamislivo, a upravo plazma rezanje zadovoljava oba zahtjeva.

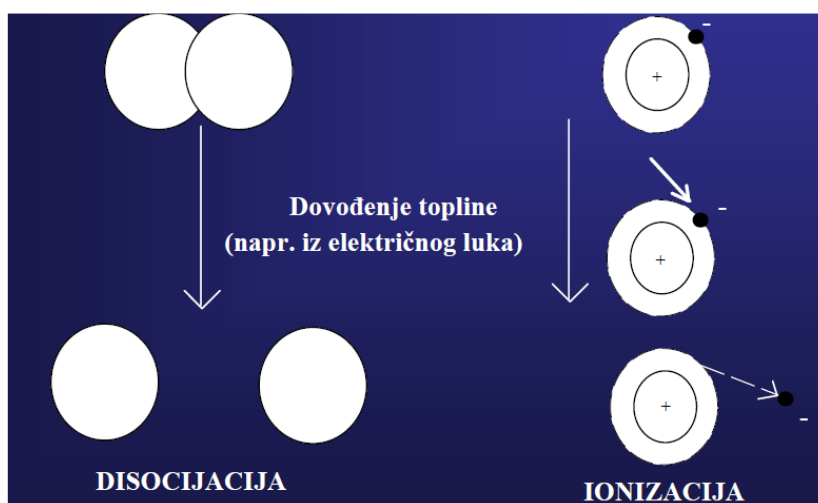
Plazma je u fizici naziv za ionizirani plin i uobičajeno je da se zbog različitih svojstava u odnosu na krutine, tekućine i plinove smatra posebnim agregatnim stanjem tvari. Neke od mogućnosti primjene plazme su zavarivanje (plazma i mikroplazma), rezanje, žljebljenje, naštrcavanje, navarivanje, zagrijavanje teškoobradivih materijala za obradu odvajanjem čestica u toplom stanju, površinske toplinske i toplinsko-kemijske obrade (nitriranje, cementiranje,...), itd.

U ovome završnom radu obrađena je tema plazme rezanja konstrukcijskog čelika te utvrđivanje kvalitete reza pomoću norme HRN EN 9013, a naposljetku je određena optimalna brzina rezanja za dobivanje kvalitetnog reza za zadane debljine konstrukcijskog čelika. Iako na tržištu plazma rezanju konkuriraju plinsko i laser rezanje, ona ima veliku prednosti u određenim segmentima rezanja.

2. PLAZMA REZANJE

2.1. Plazma

Plazma je četvrto stanje tvari; ona je električki provodljiv, disociran i visokoioniziran plin u kojem je broj pozitivnih i negativnih naboja jednak, pa je plazma kao cjelina električki neutralna (broj nosioca pozitivnog naboja, tj. kationa, jednak je broju nosioca negativnog naboja, tj. broju aniona). Slika 1. prikazuje postupak disocijacije i ionizacije plina tijekom nastanka plazme.



Slika 1. Proces stvaranja plazme [1]

2.2. Definicija plazma rezanja

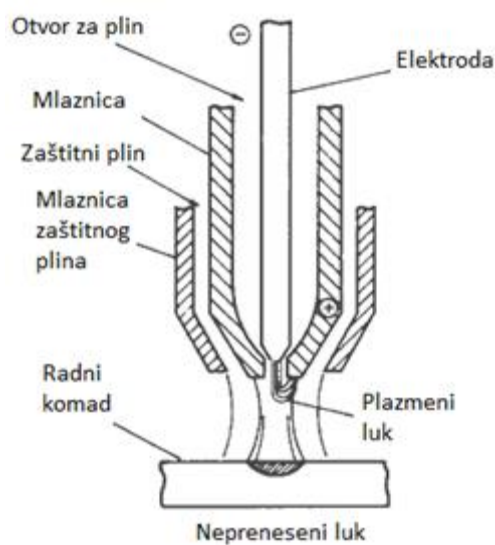
Plazma rezanje veoma je slično postupku zavarivanja plazmom. Razlika je u konstrukciji glave gorionika za rezanje i dosta višem naponu struje. Pri rezanju plazmom visoka temperatura plazmenog mlaza tali radni predmet, a taljevina se otpuhuje iz reza kinetičkom energijom plina, koji izlazi iz mlaznice. Za rezanje se najčešće koristi proces s prenosivim lukom, kojim se mogu rezati svi elektroprovodljivi materijali. Proces s neprenosivim lukom, koristi se za rezanje predmeta manjih debljina (ispod 1 mm) i materijala koji nisu elektroprovodljivi (npr. keramika). U svakom slučaju koristi se elektroda od legure volframa. Zbog niskog tlaka, plazmeni plin ne može pružiti zaštitu rezu, stoga se dovodi velika količina inertnog zaštitnog plina kroz vanjsku mlaznicu te na taj način štiti rez.

Plazma rezanje se odlikuje velikim brzinama rezanja i uglavnom se koristi u mehaniziranim sustavima. Također, rezanje je popraćeno visokom razinom buke. Plazmeni mlaz se dobiva

tlačenjem određenog plina kroz električni luk. Električni luk se uspostavlja između elektrode koja je spojena na “-” pol i radnog komada (preneseni luk) ili sapnice pištolja samog uređaja spojenog na “+” (nepreneseni luk).

2.2.1. Nepreneseni luk

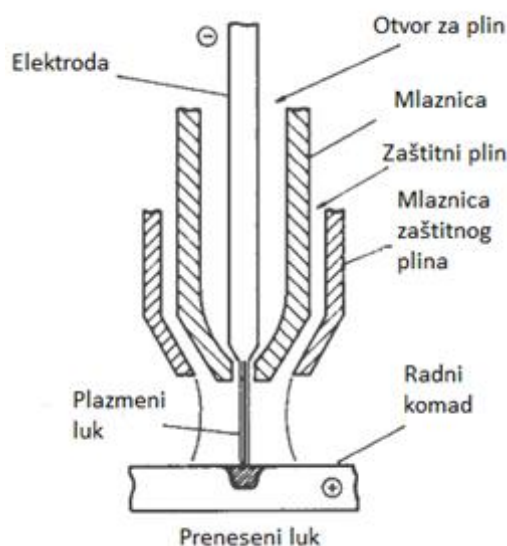
Plazmeni luk se formira između elektrode (negativan pol) i vodom hlađene mlaznice (pozitivan pol). Plazmeni mlaz je istisnut kroz sapnicu preko plazmenog plina. Luk je neovisan o radnom komadu te radni komad nije uključen u strujni krug. Ova vrsta luka koristi se za plazma naštrcavanje ili za jako niske struje kod obrade nemetala. Nepreneseni plazmeni luk ima manju gustoću energije nego preneseni luk te se koristi za plazma zavarivanje taljenjem, prevlačenjem te za naštrcavanje. Ovaj tip luka se koristi i za zavarivanje keramike, metalnih oplata kao radnih materijala te folija. Princip rada s neprenesenim lukom prikazano je na slici 2.



Slika 2. Princip rada s neprenesenim lukom [2]

2.2.2. Preneseni luk

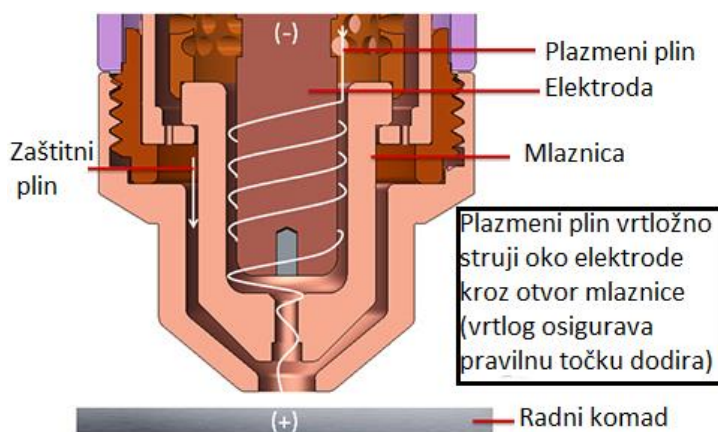
Struja se prenosi od vrha elektrode (negativni pol) kroz otvor pa sve do radnog komada (pozitivan pol) te nazad do izvora struje. Preneseni luk ima veliku gustoću energije te visoku brzinu plazmenog mlaza. Prednosti prenesenog luka su u većoj prenesenoj energiji na radni komad i ovaj tip se najčešće koristi za zavarivanje. Ovakvim lukom mogu se postići velike brzine zavarivanja. Za pokretanje prenesenog luka koristi se otpornik postavljen u strujni krug. Prvo se pali pilot luk koji ograničava struju na oko 50 A koja se uspostavlja između sapnice plazmenog luka i elektrode. Nakon što se dotakne radni komad, glavna struja protječe između elektrode i radnog komada, te se tada pokreće preneseni luk. Temperatura koja se može postići takvim plazmenim lukom iznosi između 8000 °C i 25000 °C. Princip rada s prenesenim lukom prikazano je na slici 3.



Slika 3. Princip rada s prenesenim lukom [2]

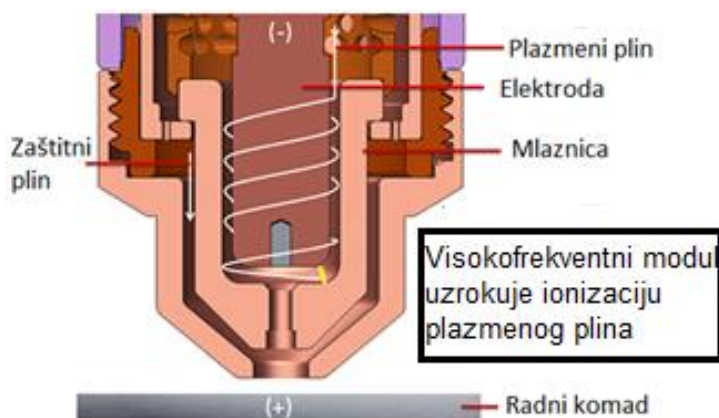
2.3. Proces plazma rezanja

Unutar plazmenog pištolja elektroda i unutarnja mlaznica se ne dodiruju, jedna od druge su izolirane vrtložnim prstenom koji ima male otvore za odušak koji transformiraju plazmeni plin u plazmeni vrtlog. Između unutarnje i vanjske mlaznice nalazi se prostor kojim struji zaštitni plin. U trenutku kada je puštena struja, dolazi do generiranja napona te se inicira protok plina kroz crijevo postavljeno na pištolju (Slika 4.). Mlaznica je privremeno spojena na pozitivan pol izvora struje, a elektroda na negativan pol.



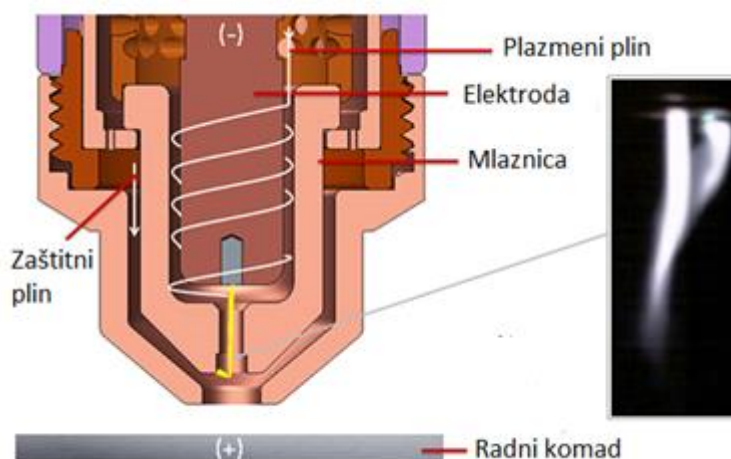
Slika 4. Početak plazma rezanja [3]

Visokofrekventnim modulom (uzrokuje ionizaciju plina) uključuje se pilot luk male snage, koji se stvara između elektrode (katoda) i osnovnog materijala (anode). Nadalje se stvara inicijalni plazmeni mlaz (Slika 5.).



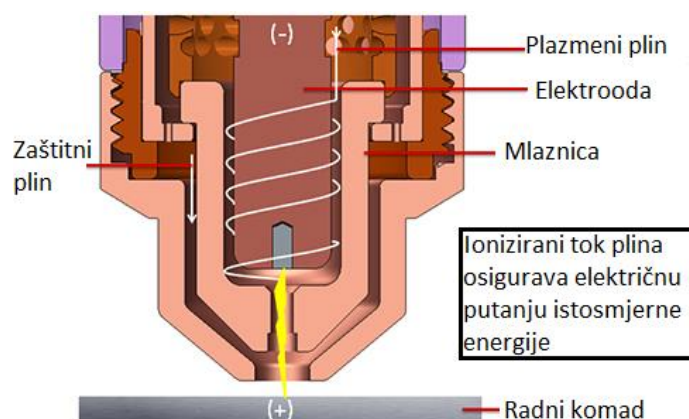
Slika 5. Ionizacija plazmenog plina [3]

Jednom kada pilot luk dođe u kontakt s radnim komadom (koji je uzemljen), struja se prelazi s elektrode na radni komad, visokofrekventivni modul se isključuje te je strujni krug zatvoren (Slika 6.) .



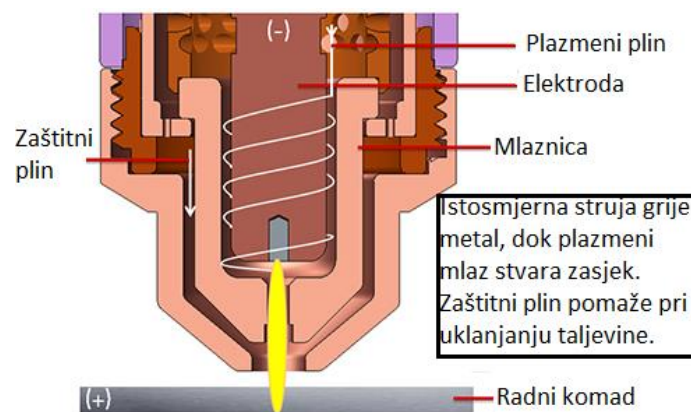
Slika 6. Stvaranje glavnog luka iz pilot luka [3]

Tada izvor istosmjerne struje generira napon rezanja namješten od strane operatera te se postiže optimalna brzina rezanja za zadani materijal. Kada luk dodirne radni komad dolazi do rezanja i probijanja radnog komada (Slika 7.). Zaštitni plin struji kroz vanjsku mlaznicu, obavija mlaz te na taj način štiti rez.



Slika 7. Putanja plazmenog mlaza do radnog komada [3]

Oblik otvora mlaznice i njen promjer dodatno sužavaju luk plazme što rezultira čistim rezom s vrlo niskim konusom kuta i manjim zasjekom (Slika 8.).



Slika 8. Plazma rezanje [3]

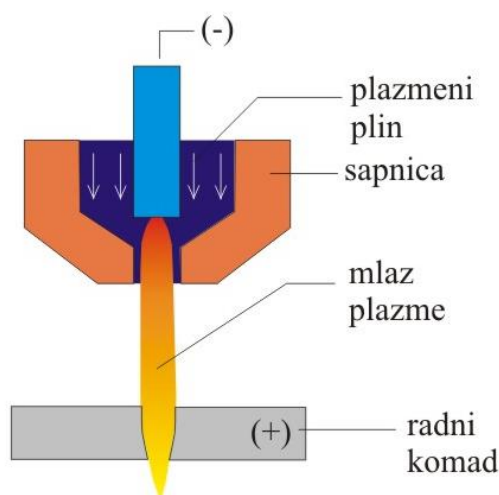
Dakle, osnovni princip je da je luk formiran između elektrode i radnog komada ograničen veličinom bakrene mlaznice. Na taj način se povećava temperatura i brzina plazmenog mlaza. Temperatura plazme doseže visinu i preko 20 000°C, dok brzina može premašiti i brzinu zvuka. Kada se koristi za rezanje, plazmeni protok plina se povećava kako bi pri dubokom prodiranju u radni materijal višak rastaljenog materijala bio uklonjen.

2. 3.1. *Tijek postupaka plazma rezanja*

Nekoliko varijanti postupka rezanja plazmom se koristi za poboljšavanje kvalitete reza.

Konvencionalni postupak rezanja.

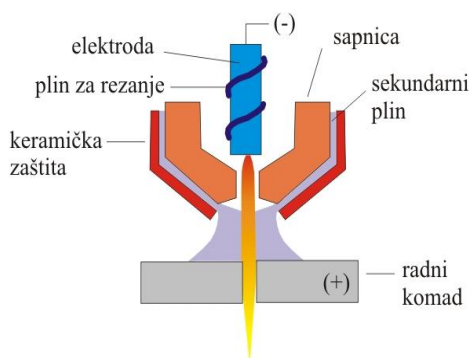
Slika 9. prikazuje konvencionalni postupak rezanja uveden 50-tih godina, koji je dominirao od 1957. do 1970. godine te je često zahtijevao vrlo skupe plinske mješavine argona i vodika. Konvencionalni postupak rezanja zvao se i tzv. “suha” tehnika s mogućnošću rezanja limova do 250 mm, no u industrijskoj primjeni koristio se za rezanje do 50 mm debljine. Problemi ovog postupka bili su pojava nakošenja i zaobljenja rubova reza zbog rasipanja toplinske energije na vrhu luka. Ova se pojava neravnoteže kasnije reducirala postavljanjem pištolja za rezanje što je bliže moguće radnom predmetu. [1]



Slika 9. Konvencionalni postupak rezanja [1]

Luk plazme s dualnim tokom

Slika 10. prikazuje postupak rezanja s lukom plazme koja sadrži dualni tok (1962.godina). Naime ova tehnika sadrži osobine konvencionalnog rezanja plazmom, ali je dodan i sekundarni plin oko sapnice s plazmom. Kao plin za rezanje najčešće se koristi dušik, a sekundarni plin se izabire prema materijalu koji se reže. Obično se koristio zrak ili kisik za niskougljične čelike, ugljični dioksid za nerhđajuće čelike, te mješavina argon/vodik za aluminij.

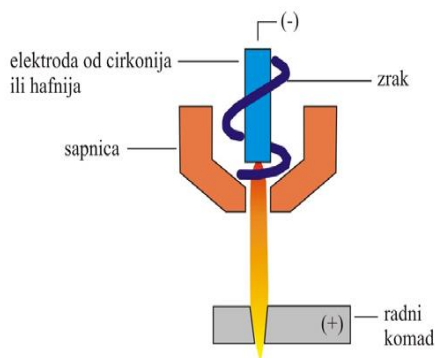


Slika 10. Luk plazme s dualnim tokom [1]

Brzine rezanja su bolje nego kod konvencionalnog rezanja za niskougljične čelike (ne za nehrđajuće i za aluminij). Kvaliteta reza nije zadovoljavajuća za sve primjene. Zaštitni plin, prekriva zonu rezanja i poboljšava kvalitetu i brzinu reza, a također i hladi sapnicu i keramičku zaštitu.

Plazma rezanje zrakom

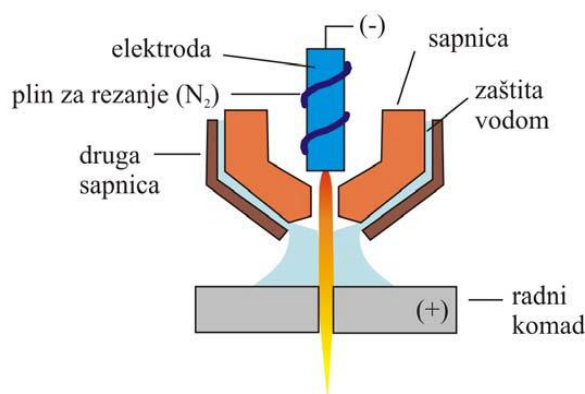
Plazma rezanje zrakom otkriveno je 1963.godine (Slika 11.). U ovom postupku kisik iz zraka osiguravao je dodatnu energiju egzotermičkom reakcijom s rastaljenim čelikom, što je povećavalo brzine rezanja do 25 % u odnosu na plazma rezanje s dušikom. Iako se proces mogao koristiti za rezanje nehrđajućeg čelika i aluminija, površina rezanja na ovim materijalima je bila vrlo oksidirana i neprihvatljiva za mnoge primjene. Najveći problem je brza erozija elektrode. Čak i s elektrodama od specijalnih materijala (cirkonij, hafnij i njegove legure) vijek elektrode pri rezanju zrakom je znatno kraći nego kod konvencionalnog rezanja plazmom.



Slika 11. Plazma rezanje zrakom [1]

Rezanje plazmom s vodenom zaštitom

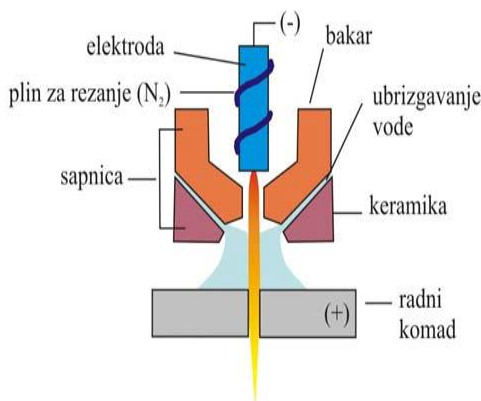
Dvije godine nakon plazma rezanja zrakom (1965.godine) u postupke plazma rezanja uvodi se i onaj pod vodenom zaštitom (Slika 12.). Ova je tehnika slična tehnici dualnog toka osim što je zaštitni plin zamjenjen vodom. Izgled reza i vijek sapnice su poboljšani zbog efekta hlađenja koji osigurava voda.



Slika 12. Rezanje plazmom s vodenom zaštitom [1]

Rezanje plazmom s ubrizgavanjem vode

1968. godine počinje se koristiti rezanje plazmom s ubrizgavanjem vode (Slika 13.). Kvaliteta reza je kod postupka sa ubrizgavanjem vode postignuta na svim metalima sa samo jednim plinom - dušikom. Zbog toga je ovaj postupak postao ekonomičniji i lakši za upotrebu. Fizikalno, dušik je idealan zbog svoje mogućnosti da prenosi toplinu s luka na radni komad. Prednost ovog postupka leži u tome da je i vijek sapnice produžen (hladi se i štiti na mjestu maksimalnog suženja i maksimalne topline luka). Zaštitna svojstva sloja vodene pare omogućila su uvođenje jedinstvene inovacije: cijeli donji dio sapnice mogao je biti izrađen od keramike. Kao posljedica toga, pojava dvostrukog luka, najveći uzročnik uništenja sapnice, je eliminirana.



Slika 13. Rezanje plazmom s ubrizgavanjem vode [1]

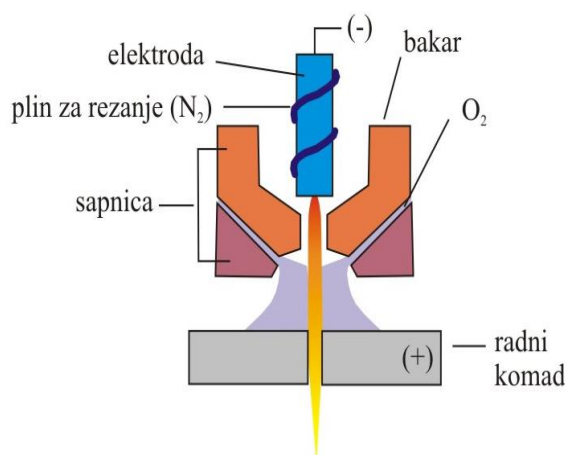
Plazma rezanje kisikom

Plazma rezanje kisikom otkriveno je 1983. godine. U početku kod ovoga procesa javljali su se problemi visoke temperature na vrhu sapnice i djelovanje čistog kisika što je dovodilo do brzog uništenja elektrode. Uvođenjem elektroda od hafnija i cirkonija te konstrukcijskim poboljšanjima glave za rezanje omogućena je upotreba kisika kao plazma plina, što je omogućilo rezanje bez troske i povećanje brzine za do 30% za vrijeme rada pri nižoj struji i dobivanje glatkih i pravilnih rubova.

Prednosti postignute ovim procesom su zadovoljavajuća kvaliteta reza na čeliku te većina korisnika smatra da je omjer između visokih brzina rezanja i kvalitete reza nasuprot kraćem vijeku elektrode zadovoljavajući. Skupi postupci uklanjanja troske koji su se često morali izvršavati kod plazma rezanja dušikom, kod rezanja kisikom su eliminirani.

Rezanje plazmom s ubrizgavanjem kisika

Slika 14. prikazuje rezanje plazmom s ubrizgavanjem kisika. Ova tehnika je zaobišla problem s vijekom elektrode korištenjem dušika kao plazma plina i ubrizgavanjem kisika na izlazu iz sapnice. Postupak je isključivo korišten na niskougličnim čelicima i nešto malo je povećao brzine rezanja. Ipak, neki od nedostataka bili su nepravilan oblik reza, ograničenost primjene (niskouglični čelici)...



Slika 14. Rezanje plazmom s ubrizgavanjem kisika [1]

2.3.2. Glavni parametri rezanja plazmom

Kod plazma rezanja postoji puno parametara koje je potrebno podesiti kako bi se osigurao stabilan proces što svakako zahtijeva dobro uvježbane operatere.

Glavni parametri plazma rezanja su:

- Snaga plazme (Jakost struje x Napon)
- Brzina rezanja
- Vrsta i količina/protok plazmenog (i sekundarnog) plina/plinske mješavine
- Udaljenost mlaznice od radnog komada

2.3.2.1. Snaga plazme

Izvor struje i napon

Izvori struje za rezanje plazmom su posebno konstruirane jedinice s vrijednošću napona praznog hoda u opsegu od 120-400 V (u odnosu na 70-85 V za izvore struje namijenjene zavarivanju električnim lukom). Izbor izvora struje vrši se na osnovu konstrukcije gorionika plazme koji se koristi, vrste i debljine radnog komada koji se reže i opsega brzine rezanja. Koriste se uređaji istosmjernje struje koje karakterizira konstantna struja sa strmopadajućim naponom.

Postupak rezanja plazmom odvija se pri istosmjernjoj struji kada je elektroda priključena na negativni pol, prenosivim lukom. Pri težim zahtjevima rezanja zahtijeva se visoka vrijednost napona praznog hoda od 400 V za prorezivanje materijala debljine 50 mm. Oprema za ručno rezanje plazmom koristi visoku vrijednost napona praznog hoda od 120-200 V. Ovako visoki naponi zahtijevaju stalnu pažnju operatera pri rukovanju opremom. Izlazna struja iz izvora struje za luk plazme može se kretati od 10-1000 A, u zavisnosti od materijala koji će se rezati, njegove debljine i brzine rezanja. Slika 15. prikazuje jedan od uređaja korišten kao izvor struje za plazma rezanje.



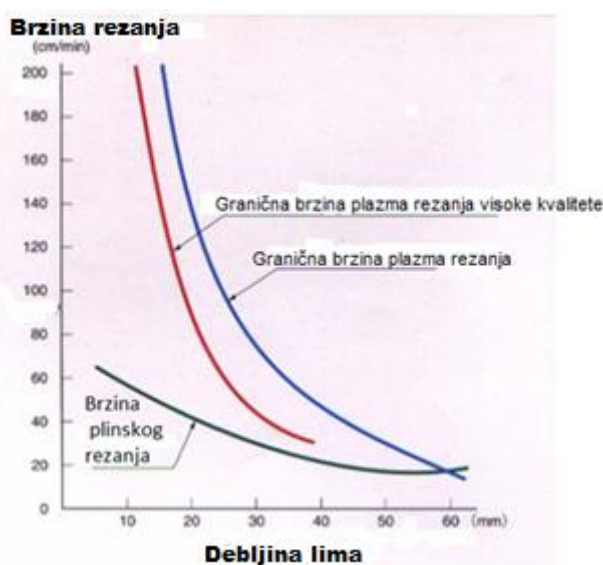
Slika 15. Izvor struje za plazma rezanje [4]

2.3.2.2. Brzina rezanja

Za visoku ekonomičnost procesa treba osigurati uski rez, visoku kvalitetu i čistoću odsječenog materijala s gornje i donje strane. Za zadani izvor struje i mješavinu plinova postoji optimalna brzina rezanja svake vrste materijala i debljine. Povećana brzina rezanja smanjuje širinu reza uz povećanje kosine izratka, ali jakost struje je ipak najvažniji čimbenik koji uvjetuje širinu reza. Za ručno rezanje kompliciranih rezova optimalna brzina iznosi 1 m/min. Općenito brzine od nekoliko m/min služe za podrezivanje rezova.

Prilikom definiranja brzine rezanja najbolji način je promatranje luka, kada on izlazi iz radnog komada. Ako se koristi zračna plazma, luk treba biti okomit na radni komad tijekom izlaska s donje strane reza ili nula stupnjeva gledavši ulaz i izlaz luka iz radnog komada. Ako se koristi dušična plazma ili plazma rezanje s argonom / vodikom, luk na izlazu iz komada treba biti suprotan smjeru mlaza.

Brzinu rezanja treba prilagoditi kako bi se dobio kvalitetan rez. Brzina rezanja koja je prespora ili prebrza uzrokovat će probleme kvalitete reza. Kod većine metala postoji prostor između ove dvije krajnosti koji će dati ravne, čiste komade bez troske. Slika 16. prikazuje ovisnost brzine rezanja o debljini materijala. Na slici lijevo prikazana je usporedba plinskog i plazma rezanja gdje se vidi da se plazma rezanjem mogu rezati tanji materijali puno većim brzinama rezanja. Na slici desno prikazani su dijagrami za niskouglični čelik, CrNi čelik te aluminij na kojem su prikazane ovisnosti brzine rezanja i debljine materijala za dobivanje kvalitetnog i maksimalnog reza.



Slika 16. Ovisnost brzine rezanja o debljini materijala [1]

2.3.3. Zaštitni plinovi i plinovi za rezanje plazmom

Inertni plinovi poput argona, helija i dušika (osim na povišenim temperaturama) se koriste s volfram elektrodom. Zrak se može koristiti kao plin za rezanje ukoliko su elektrode, hladene vodom, izrađene od bakra s metalnim umetcima, poput hafnija.

Gotovo sva plazma rezanja niskougljičnog čelika učinjena su s jednim od tri vrste plina:

1. Dušik u zaštiti ugljičnog dioksida ili ubrizgavanje vode (mehanizirano),
2. Dušik-kisik ili zrak,
3. Mješavine argon-vodik i dušik-vodik.

Prve dvije kombinacije postale su standard za visokobrzinske mehanizirane procese. Argon-vodik i dušik-vodik (20 do 35 % vodika) se povremeno upotrebljavaju za ručno rezanje, ali s mogućnošću formiranja troske na dnu reza. Prilikom formiranja troske uz prisutnost argona javlja se povećana površinska napetost rastaljenog metala. Površinska napetost rastaljenog čelika nastala uz prisutnost argona 30% je veća u odnosu na njenu pojavu uz prisutnost dušika.

Kod korištenja zraka kao plazmenog plina, mlaz plazme sklon je ukloniti više metala s gornjeg dijela radnog komada nego s donjeg. Rezultat su neparalelni isječki površina.

Korištenjem argon-vodika mogu se pojaviti nejednoliki profili presjeka koji su kvadratni na jednoj strani i skošeni na drugoj.

2.3.3.1. Plinovi za rezanje

Zrak

1. Uglavnom se koristi za materijale na bazi željeza ili ugljika za dobivanje dobre kvalitete bržim brzinama rezanja.
2. Preporuča se korištenje samo čistog, suhog zraka. Svako ulje ili vlaga u dovod zraka znatno će smanjiti djelotvornost.
3. Zračna plazma se obično koristi sa zrakom kao sekundarnim plinom.
4. Relativno lako dostupan.
5. Vijek trajanja potrošnih materijala je prihvatljiv.
6. Kvaliteta reza je prihvatljiva za većinu materijala, iako kod ugljičnih čelika može doći do pojave nitracije, ili oksidacije koja se obično javlja na aluminiju i nehrđajućem čeliku.

Dušik

1. Može se koristiti umjesto plazme sa zrakom.
2. Djelotvornija je od zraka.
3. Daje izvrsnu kvalitetu reza na aluminiju i nehrđajućem čeliku.
4. Za visoku kvalitetu reza treba koristiti čisti dušik.
5. Kvaliteta reza na većini ugljičnih čelika je marginalna zbog pojave nitracije na površini i formiranja troske.
6. Vijek trajanja potrošnog materijala je izvrstan.
7. Dušik zahtijeva veći napon (i energiju) kod prelaska u stanje plazme, ali mu je zato sadržaj energije veliki.

Argon / vodik - koristi se za dualne plinske sustave radi poboljšanja kvalitete reza na nehrđajućim čelicima i aluminiju.

1. Preporučena mješavina je 65% argona i 35% vodika.
2. Preporučeno je korištenje na nehrđajućem čeliku debljine 19 mm i više. Preporučuje se za obojene materijale debljine 12 mm i više. Kombinaciju Ar / H₂ je nepotrebno koristiti za tanje obojene materijale jer jeftiniji plinovi mogu postići sličnu kvalitetu reza.

3. Pruža visoke brzine i visoku kvalitetu reza za deblje materijale.
4. Loša kvaliteta reza na željeznim materijalima.
5. Vijek potrošnog materijala je izvrstan.
6. Premalo H_2 daje grublju površinu reza i zaobljen gornji rub reza, a previše H_2 daje glatku gornju stranu reza, ali na donjem rubu ostaje dio rastaljenog metala.
7. Argon osigurava lagano uspostavljanje luka i njegovu stabilnost, dok mu je s druge strane sadržaj energije manji i cijena nešto veća.

Kisik - koristi za dobivanje najbolje kvalitete reza na ugljičnim čelicima.

1. Kisik se preporučuje za rezanje neželjeznih metala.
2. Daje visoke brzine rezanja.
3. Pruža vrlo glatke završne površine i minimizira nagomilavanje nitrida na površine reza (ako se ne uklone, nakupine nitrida mogu uzrokovati poteškoće u proizvodnji visoke kvalitete zavora).
4. Do nedavno vijek dodatnih materijala je bio u granici prihvatljivosti. Danas je trajanje potrošnih materijala poboljšano. [1]

3.3.3.2. Sekundarni plinovi

Zrak

1. Sekundarni zrak obično se koristi kada se radi sa plazmom sa zrakom kao reznim plinom te ponekad i sa plazmom s dušikom kao reznim plinom.
2. Jeftin - smanjuje operativne troškove.
3. Poboljšava kvalitetu reza nekih željeznih materijala.

CO₂

1. CO₂ se koristi kod dušične ili Ar / H₂ plazme.
2. Povećava djelotvornost procesa i hlađenje obratka je brže.
3. Koristan za nebojene i obojene materijale.
4. Smanjuje dim kada se koristi s Ar / H₂ plazmom. [1]

2.3.3.3. Smjernice za izbor plina za rezanje plazmom

U tablici 1. prikazane su preporuke korištenja određenih plazmenih plinova za pojedine materijale.

Tablica 1. Prikaz kvalitete reza pojedinim plazma postupcima na određenim materijalima [5]

Plin	Debljina materijala (mm)	Materijal		
		Ugljični čelik	Nehrđajući čelik	Aluminij
Plazmeni plin: zrak Zaštitni plin: zrak	< 12	Odlično	Dobro	Dobro
	≥ 12	Odlično	Zadovoljava	Zadovoljava
Plazmeni plin: dušik Zaštitni plin: zrak ili CO ₂	< 12	Odlično	Odlično	Odlično
	≥ 12	Odlično	Odlično	Odlično
Plazmeni plin: Ar/H ₂ Zaštitni plin: dušik ili CO ₂	< 6	Nije preporučljivo	Nije preporučljivo	Nije preporučljivo
	od 6 do 30	Nije preporučljivo	Dobro	Odlično
	≥ 30	Nije preporučljivo	Odlično	Odlično

Ugljični čelici:

- Zrak kao plazmeni plin: visoka produktivnost, manje onečišćenje nitridima i oksidima na površini reza
- Kisik kao plazmeni plin: visoka produktivnost, rezna površina bez onečišćenja nitridima

Cr-Ni čelici:

- Zrak kao plazmeni plin: visoka produktivnost, prihvatljiva kvaliteta reza, potrebna naknadna obrada ako slijedi zavarivanje
- Mješavina Ar H₂/Ar H₂ N₂ kao plazmeni plin: vrlo čista površina reza

Aluminij:

- Zrak kao plazmeni plin: visoka produktivnost, prihvatljiva kvaliteta reza
- Mješavina Ar H₂ kao plazmeni plin: izuzetna kvaliteta površina reza

2.3.4. Debljina i smjer rezanja

Za rezanje materijala do 6 mm debljine, plazma sustav niske struje bit će dovoljan. Za rez do 12 mm debljine već će biti potreban stroj s višim izvorom struje. Iako manji stroj može biti u mogućnosti zadovoljiti debljinu od 12 mm, rez će biti slabije kvalitete (stvora se troska i pepeo). Općenito, stroj za dubinu do 6mm ima oko 25 A izlazne struje, stroj za dubinu od 12mm ima 50-60 A izlazne struje, dok onaj od 18 mm do 25 mm ima izlaznu struju od 80 A.

Općenito rezanje moguće je provesti u dva smjera, u smjeru kazaljke na satu ili obrnuto. Za plazma rezanje bolji je postupak u smjeru kazaljke na satu jer ono daje manje zaobljenje vrha reza i samim time kvalitetniji rez. Jedna od odlika vrtloženja plina je efikasniji prijenos energije luka na jednu stranu proreza. Pri vrtloženju u smjeru kazaljke na satu, npr., desna strana reza (gledajući u smjeru napredovanja) bit će prikladno uspravna, a lijeva strana reza bit će zakošena. Zbog toga, smjer napredovanja (rezanja) mora se vršiti tako da se otpadni metal postavi na lijevu stranu. [6]

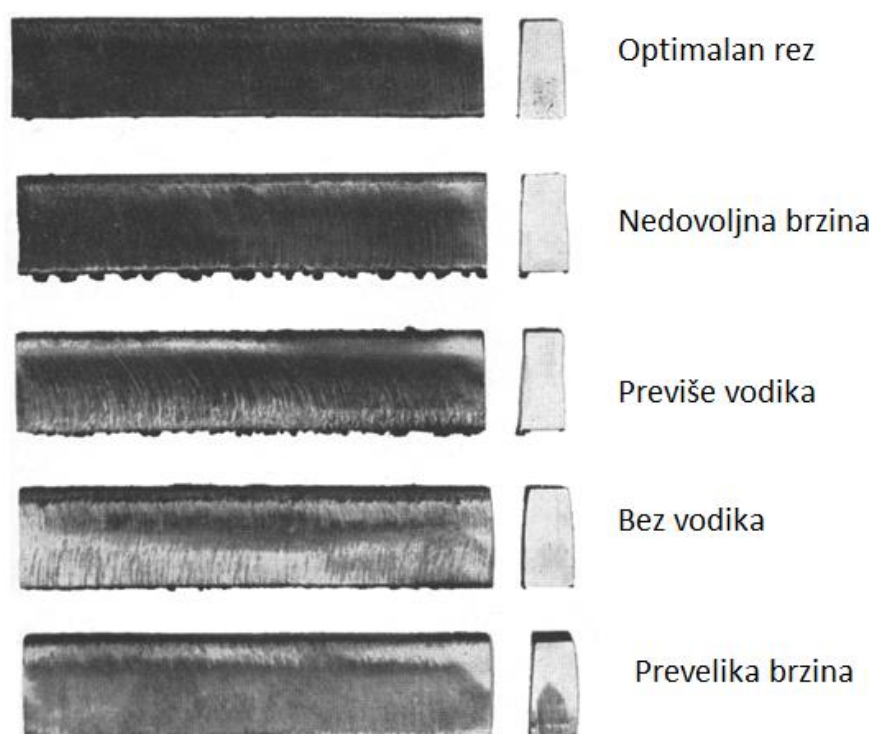
2.3.5. Kvaliteta reza

Faktori koji određuju kvalitetu rezanja plazmom su glatkoća površine, širina reza, paralelnost stranica reza, troska koja se nalazi na donjoj stranice reza, uspravnost reza i oštrina gornjeg reza. Ovi faktori su određeni vrstom materijala koji se reže, konstrukcijom opreme i njenim podešavanjem.

Općenito, visokokvalitetni rezovi se dobivaju pri srednjoj snazi i niskim brzinama rezanja. Međutim, niska brzina rezanja ugrožava ekonomske pokazatelje. Zbog toga, ono što predstavlja zahtijevanu kvalitetu reza, treba definirati prije primjene postupka. Rezovi plazmom na limovima debljine do 75 mm mogu imati glatkoću površine veoma sličnu onoj koja se dobiva plinskim rezanjem. Skoro ne postoji oksidacija površine pri korištenju moderne automatske opreme koja koristi injektiranju vodu ili zaštitu vodom. Na debljim limovima, manje brzine rezanja proizvode grublju reznju površinu.

Širine reza plazmom su 1,5 do 2 puta veće u odnosu na plinske rezove na limovima debljine do 50 mm. Npr., tipična širina reza na nehrđajućem čeliku debljine 25 mm je približno 4,8 mm u odnosu na rez od 3,2 mm pri plinskom rezanju. Širina reza raste s debljinom lima pri korištenju rezanja plazmom, baš kao pri drugim postupcima rezanja. Rez plazmom na nehrđajućem čeliku debljine 180 mm izrađen pri 100 mm/min ima širinu reza od 29 mm.

Troska je materijal koji se tali za vrijeme rezanja i prijanja na donju stranicu reza. Pomoću sadašnje automatske opreme, mogu se proizvoditi rezovi slobodni od troske na aluminiju i nehrđajućem čeliku do debljine približno 80 mm. Kod ugljičnog čelika, izbor brzine i struje je utjecajniiji na trosku koja se na ovom materijalu mora naknadno skidati kad se poveća brzina rezanja. Zaobljenja stranice reza nastaju kada se koristi prekomjerna snaga za rezanje dane debljine lima, ili kad je gorionik postavljen suviše visoko. Ono može također nastati pri rezanju velikom brzinom materijala debljine manje od 6 mm. Slika 17. prikazuje pojedine greške pri uporabi pogrešnih parametara rezanjem plazmom.



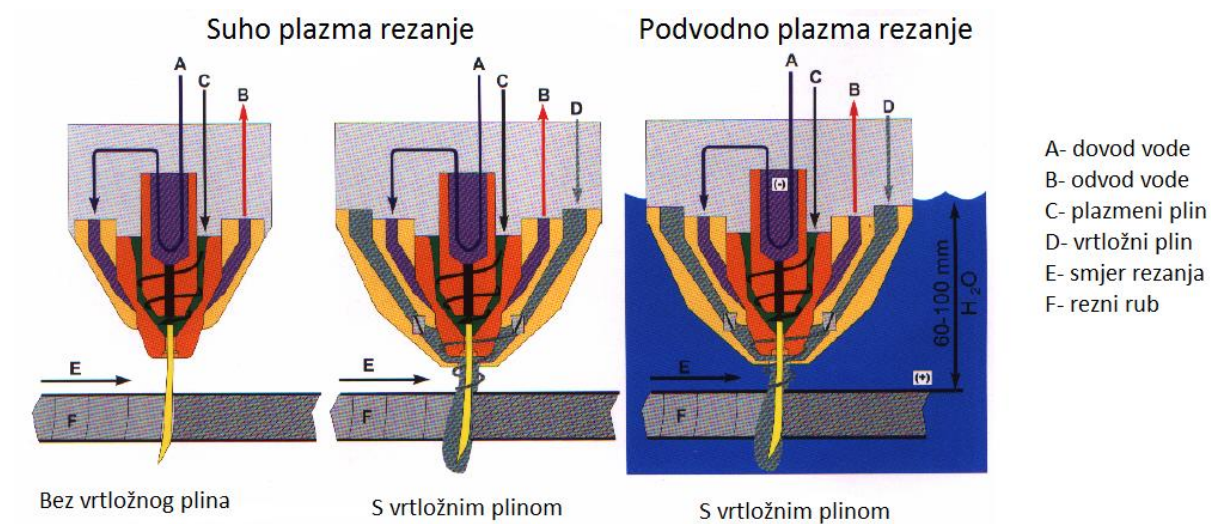
Slika 17. Prikaz različitih presjeka rezova u ovisnosti o izabranim parametrima [1]

2.3.6. Suvremena oprema za rezanje

Uz sve veće zahtjeve tržišta i sve veću konkurenciju srodnih postupaka javlja se suvremena oprema za rezanje. Tehnologije HiFocus i FineFocus su uz već postojeće visoke brzine rezanja i povoljan trošak po metru reza te male investicije u opremu (u odnosu na uvođenje lasera) unaprijedile kvalitetu reza do mjere da naknadna obrada površina više nije potrebna. Pogotovo je to došlo do izražaja kod manjih debljina gdje je sve više ova tehnologija istisnula laser. Plinsko rezanje zadržalo je mjesto vodećeg kod većih debljina limova, no na konstrukcije sa debljinama stijenki preko 40 mm otpada svega nekoliko postotaka u odnosu na ukupnu količinu proizvedenih metalnih konstrukcija. [7]

Primjeri suvremene opreme za rezanje:

- FineFocus torches with swirl gas technology (FF gorionici s "vrtložnim" sekundarnim plinom (Kjellberg)). Kod ove tehnologije moguće je i suho rezanje i rezanje pod vodom, i prema tome se koristi razna kombinacija plinova za plazma rezanje i za zaštitu, a često se koristi i zrak (Slika 18.).



Slika 18. FF gorionici s "vrtložnim" sekundarnim plinom [1]

- b) FineFocus i HiFocus tehnologija (Kjellberg) - u tablici 2. navedene su karakteristike Kjellbergovih uređaja koji su namijenjeni, odnosno prilagođeni za efikasnu primjenu u 3D robotiziranom plazma rezanju. Koji od ovih uređaja izabrati ovisi isključivo o ciljanim debljinama materijala koje će se rezati. Navedeni uređaji namijenjeni su za strojno plazma rezanje vidljivih bridova i postižu visoku kvalitetu reza tako da nije potrebna naknadna obrada.

Tablica 2. Kjellbergovi plazma uređaji za 3D robotizirano plazma rezanje [7]

TIP UREĐAJA	Hi Focus 130	Hi Focus 160i	Hi Focus 280i Hi focus 360i	FineFocus 800
Područje primjene (kvalitetan rez), mm	0,5 do 30	0,5 do 35	0,5 do 50 0,5 do 60	5 do 50 (na suho)
Maksimalna debljina rezanja, mm	Do 40	Do 50	Do 70 Do 80	Do 80 na suho Do 40 pod vodom
Preporučena debljina rezanja, mm	Do 30	Do 35	Do 50 Do 60	Do 40
Područje struje rezanja, A	20 do 130	4 do 160	5 do 280 4 do 360	80 do 300
Plazmeni plinovi za konstrukcijske čelike	O ₂	O ₂	O ₂	O ₂
Plazmeni plinovi za nehrđajuće čelike	N ₂ , Ar/H ₂ , Ar/H ₂ /N ₂	N ₂ , Ar/H ₂ , Ar/H ₂ /N ₂	N ₂ , Ar/H ₂ , Ar/H ₂ /N ₂	N ₂ , Ar/H ₂ , Ar/H ₂ /N ₂
Plazmeni plinovi za aluminijske legure	N ₂ , Ar/H ₂ , Ar/H ₂ /N ₂	N ₂ , Ar/H ₂ , Ar/H ₂ /N ₂	N ₂ , Ar/H ₂ , Ar/H ₂ /N ₂	N ₂ , Ar/H ₂ , Ar/H ₂ /N ₂

2.3.7. Primjena postupka

Plazma rezanje se može koristiti za rezanje svih metala. Najviše se primjenjuje za ugljični čelik, aluminij i nehrđajuće čelike, jednostavno zbog toga što su oni najuobičajeniji metali koji se koriste. No, postupak rezanja plazmom primjenjuje se jednako dobro na svakom metalu: bakru, mesingu i bronci; niklu i njegovim legurama kao i za rezanje urana. Rezanje plazmom koristi se za rezanje u paketima, zakošenje debelih limova, profilno rezanje i prorezivanje otvora. Plazmeni mlaz stvara rez s manje unesene topline u osnovni materijal nego plinski plamen (iako je temperatura plazme veća), što je posljedica bržeg pomicanja gorionika plazme nego gorionika za plinski plamen kao i mehanizma rezanja (plazma tali i isparava metal, a plinski plamen sagorijeva metal). Rezultat rezanja plazmom je manja deformacija osnovnog materijala.[6]

Plazmeni gorionici za rezanje se najčešće koriste na strojevima za profilno rezanje (rezanje raznih oblika) kao i na strojevima za razrezivanje i pravokutno rezanje velikom brzinom. Zahtijeva se veoma mali rad operatera zbog toga što su uključene visoke struje i visoki naponi praznog hoda. Nivo buke mlaza plazmenog plina velike brzine je također veoma visok i postupak može proizvesti mnogo zagušljivih metalnih para. Buka i zagušljive pare se veoma teško eliminiraju pri radu s ručnim gorionikom. Oni nisu problem za automatski gorionik koji se može montirati na pogodnom stroju za plinsko rezanje. Zagušljive pare, toplina i buka proizvedene plazmenim gorionikom se lako eliminiraju na stroju sa stolom za rezanje koji je napunjen vodom. Voda samo dodiruje dno lima gdje ona zahvaća dimove i trosku. Voda također prigušuje zvuk koji proizvodi mlaz plazme visoke brzine pri napuštanju glave gorionika.

Plazma postupkom se mogu rezati metali manje debljine pri brzinama od 2,5 do 4 m/min, dok bi koristeći plinski gorionik odgovarajuće brzine bile od 0,5 do 0,7 m/min. Operater pri ručnom radu se teško može nositi s brzinom efikasnog rada režućeg plazma-gorionika. Debeli limovi (preko 70 mm) od ugljičnog čelika mogu se rezati brže plinskim postupkom nego plazmom. Međutim, za rezanje debljina ispod 25 mm, rezanje plazmom je do pet puta brže nego plinskim postupkom rezanja. Na strojevima je uobičajeno da se gorionici za rezanje plazmom montiraju zajedno s plinskim gorionicima, što omogućava brz prelazak s plinskog rezanja na rezanje plazmom i obrnuto, u zavisnosti od toga da li se reže željezni ili neželjezni materijal, odnosno, debeli ili tanki materijal.

2.3.8. Usporedba postupka plazma, plinskog i laserskog rezanja

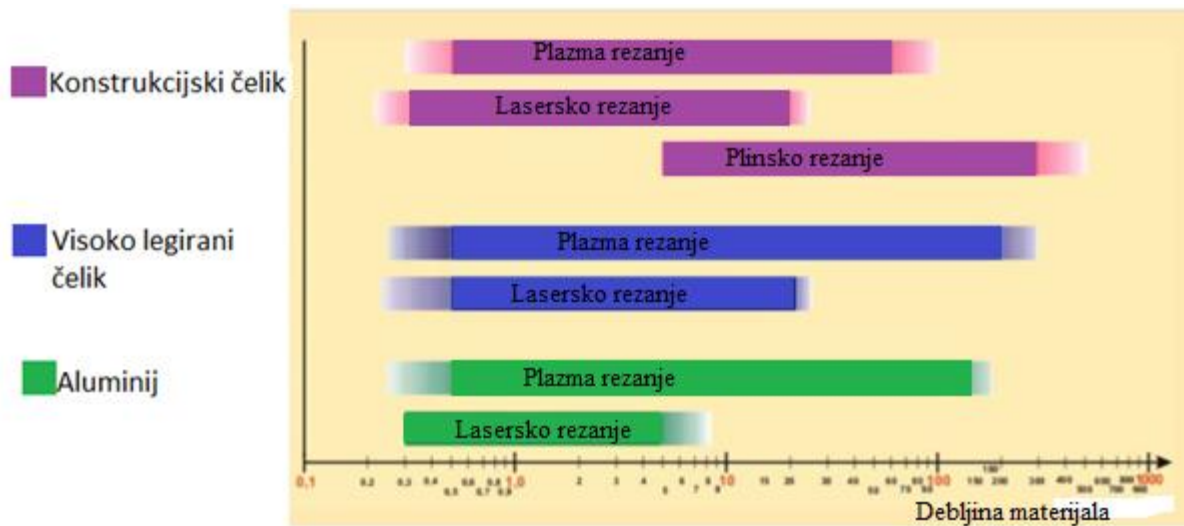
Tablica 3. prikazuje prednosti i nedostatke korištenja tri postupka toplinskog rezanja: plazma, laser i plinskog.

Tablica 3. Prednosti i nedostaci postupka plazma, plinskog i laser rezanja [7]

Postupak rezanja	Prednosti	Nedostaci
Plinsko rezanje	<ul style="list-style-type: none"> - za srednje i veće debljine materijala - rast ekonomičnosti uporabom više gorionika - manje investicije i manji troškovi u uporabi - mogućnost povezivanja do tri gorionika na jedan kazetu 	<ul style="list-style-type: none"> - loša kvaliteta reza ispod 5 mm debljine materijala - izražene toplinske deformacije kod rezanja manjih debljina, obavezno ravnanje - visoki unos topline, veliki ZUT - veća odstupanja mjera zbog rastezanja materijala uslijed visokog unosa topline u materijal - male brzine rezanja
Plazma rezanje	<ul style="list-style-type: none"> - moguće rezanje svih električki vodljivih materijala - bez alternative za rezanje visokolegiranih čelika i aluminjskih legura srednjih i većih debljina - optimalna tehnologija za rezanje tanjih i srednjih debljina limova (do 30mm) - rezanje sitnozrnatih čelika uz mali unos topline - nije potrebna naknadna obrada površine reza kod tanjih i srednjih debljina limova kod korištenja 	<ul style="list-style-type: none"> - ograničenje debljina rezanja do 160 (180) mm kod suhog rezanja i 120 kod rezanja ispod vode - nešto veća širina reza u odnosu na lasersko rezanje

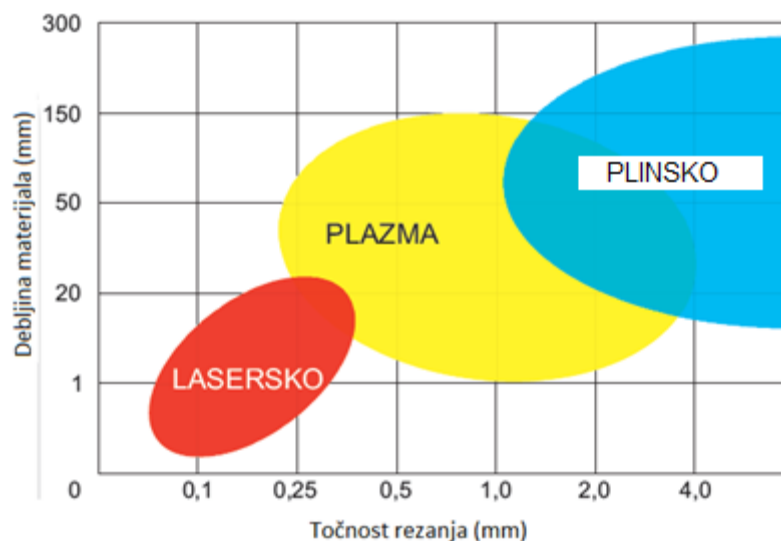
	<p>tehnologije vrtložnih plinova u kombinaciji s plazmenim plinovima</p> <ul style="list-style-type: none"> - do deset puta veće brzine rezanja u odnosu na plinsko rezanje - pogodno za automatizaciju - podvodno rezanje smanjuje unos topline i širenje buke u radni prostor 	
Lasersko rezanje	<ul style="list-style-type: none"> - visoka točnost reza kod tanjih i limova srednje debljine - odlično reže male konture, rupe, utore, oblike sa šiljcima - pravokutni oblik površine reza - izvrsna mogućnost automatizacije - mali unos topline, minimalne deformacije - vrlo uski rez (0,2 -0,4mm) - visoke brzine kod rezanja tanjih limova 	<ul style="list-style-type: none"> - visoka cijena investicije u opremu i visoki troškovi rada - gornja granica debljine rezanja 20 mm za konstrukcijske čelike, 15 mm za nehrđajuće i 10 mm za aluminij - potrebno vrlo precizno vođenje - mali stupanj iskorištenja (CO₂ oko 10%) - problemi sa stabilnošću rezanja kod rezanja reflektirajućih materijala - nečistoće u materijalu znatno utječu na stabilnost procesa - neravnine na materijalu utječu na brzinu rezanja

Na slici 19. je vidljivo da je za glavne grupe metalnih materijala upravo plazma postupak rezanja onaj koji pokriva najširi raspon debljina rezanja. To čini plazma rezanje univerzalnim uređajem za gotovo svaku namjenu bilo da se radi o rezanju lima debljine 0,8 mm ili 30 mm.



Slika 19. Namjena postupka za pojedine materijale i njihove debljine [7]

Slika 20. Prikazuje primjenu postupaka rezanja za zahtjevanu debljinu materijala i točnost reza.



Slika 20. Prikaz točnosti primjenom toplinskih postupaka rezanja [8]

Na odabir tehnologije rezanja za svaku pojedinu namjenu utječe uvijek više faktora. Ako tvrtka već posjeduje neki od rezača za očekivati je da će pokušati na njemu izrezati što širi raspon debljina i vrsta materijala vodeći računa da u područjima rubnih mogućnosti stroja ne probije kalkulativne troškove. Ako je tvrtka pred odlukom u koju tehnologiju rezanja investirati svakako je važno da li će u periodu eksploatacije od minimalno 5 godina stroj raditi u jednoj, dvije ili tri smjene ili tek povremeno. Što je veće opterećenje stroja to se više računa mora voditi o brzini i pouzdanosti stroja pri velikim opterećenjima, troškovima u funkciji te servisima i potrošnim dijelovima. Ako se većinom reže samo jedan materijal ili uski raspon debljina onda je moguće odabrati optimalno rješenje s obzirom na visinu investicije i kasnije troškove u proizvodnji. Naravno takva rješenja gube na fleksibilnosti i ako dođe do promjene programa u proizvodnji nužna je ponovna nabava nove opreme. Analize troškova i optimalnog izbora opreme i tehnologije najbolje je raditi precizno od slučaja do slučaja. U tablici 4. navedeni su troškovi rezanja konstrukcijskog čelika kako bi se prikazala komparacija tri postupka rezanja (plazma rezanje, lasersko i plinsko rezanje) na temelju ekonomičnosti postupka. Čelik koji je korišten je EN S355J0.

Tablica 4. Ekonomska bilanca postupaka rezanja za čelik EN S355J0 [9]

Troškovi/Tehnologija	Plazma rezanje	Lasersko rezanje	Plinsko rezanje
Troškovi plina	4,08 €/h	7 €/h	3,7 €/h
Troškovi energije	8,1 €/h	7,5 €/h	-
Radni sati stroja u godini	1600 h	1600 h	1600h
Kamatni troškovi	6750 €/godini	9500 €/godini	1250 €/godini
Troškovi osiguranja	6750 €/godini	9500 €/godini	1250 €/godini
Troškovi prostora	3840 €/godini	3840 €/godini	3840 €/godini
Troškovi održavanja	5400 €/godini	7600 €/godini	1000 €/godini
Stopa po satu stroja	31,0875 €/h	42,775 €/h	7,71 €/h
Broj savjetovanja	1	1	1
Trošak savjetovanja	2,6 €/h	0,2 €/h	0,25 €/h
Broj katoda	1	-	-
Trošak katoda	1,2 €/h	-	-
Broj leća	-	1	-
Trošak leća	-	0,8 €/h	

Ukupna duljina reza	0,60 m	0,60 m	0,60 m
Ukupno vrijeme početka rezanja	0,001 h	0,0008 h	0,0027 h
Ukupno vrijeme rezanja	0,0043 h	0,0066	0,015 h
Ukupni troškovi rada	7,46 €/h	8,77 €/h	7,57 €/h
Ukupni trošak plinova	0,0175 €/h	0,0462 €/h	0,055 €/h
Ukupni trošak energije	0,0348 €/h	0,05 €/h	-
Ukupni trošak strojnih sati	0,133 €/h	0,2823 €/h	0,12 €/h
Ukupni troškovi savjetovanja	0,011 €/h	0,00132 €/h	0,00375 €/h
Ukupni troškovi katoda/leće	0,00516 €/h	0,00528 €/h	-
Ukupni troškovi rezanja	7,66 €/h	9,16 €/h	7,75 €/h
Utrošena snaga po satu	139,53 W/h	90,91 W/h	40 W/h
Cijena po metru (za istu debljinu)	0,055 €/m	0,1 €/m	0,19 €/m

Ukupni trošak rezanja za navedena tri postupka dobivena je formulom:

$$C_{uk} = C_{tot,r} + C_{tot,p} + C_{tot,e} + C_{tot,ss} + C_{tot,s} + C_{tot,kl} \text{ [€/h]}$$

Gdje je:

$C_{tot,r}$ – Ukupni troškovi rada [€/h]

$C_{tot,p}$ – Ukupni trošak plinova [€/h]

$C_{tot,e}$ – Ukupni trošak energije [€/h]

$C_{tot,ss}$ - Ukupni trošak strojnih sati [€/h]

$C_{tot,s}$ – Ukupni trošak savjetovanja [€/h]

$C_{tot,kl}$ - Ukupni trošak katode/leće [€/h]

Prema prethodnoj Tablici 4. za konstrukcijski čelik EN S355J0 vidljivo je da je, sa strane ekonomskog gledišta, upravo plazma rezanje najpodobnije za korištenje.

2.4. Norma HR EN ISO 9013-2003

Norma pod nazivom „Toplinsko rezanje – Razredba rezova – Geometrijska specifikacija proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće“ vrijedi za sve vrste toplinskog rezanja materijala, a njihove rezove klasificira prema dozvoljenim odstupanjima kakvoće.

Ova norma uključuje geometrijsku specifikaciju proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće. Geometrijske specifikacije proizvoda su primjenjive ako je napravljena referenca prema normi HRN EN ISO 9013 u crtežima ili relevantnim dokumentima. Sljedeći dokumenti norme sadrže odredbe koje su potkrijepljene referencama u tekstu, uključujući i odredbe ovih normi: ISO 1302:2002 Geometrijske specifikacije proizvoda - Oznaka sastava površine u tehničkoj dokumentaciji

ISO 2553:1992 Zavareni, lemljeni spojevi – Prikazivanje simbolima na crtežima

ISO 3274:1996 Geometrijske specifikacije proizvoda – Struktura površine: Metoda profila - Nominalne karakteristike dodirnih uređaja

ISO 4287:1997 Geometrijske specifikacije proizvoda – Tekstura površine: Metoda profila – Oznake, definicije i parametri teksture površine

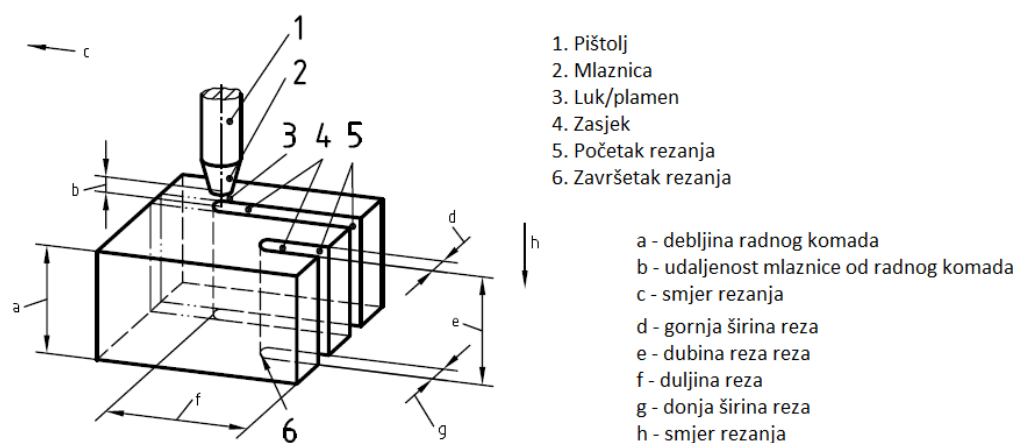
ISO 4288:1996 Geometrijske specifikacije proizvoda – Tekstura površine: Metoda profila – Pravila i procedure za procjenu teksture površine

Područje primjene

Ova norma se odnosi na materijale pogodne za plinsko rezanje, plazma rezanje i rezanje laserom. Kod plinskog rezanja koristi se za rezove od 3 mm do 300 mm, za plazma rezove od 1 mm do 150 mm te za laser rezove od 0,5 mm do 40 mm.

2.4.1. Oznake i definicije objašnjene slikama

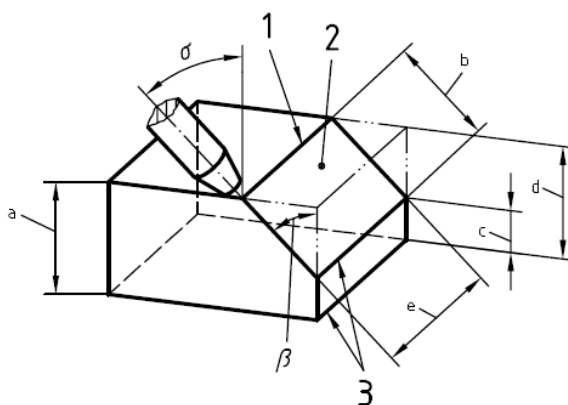
Slika 21. prikazuje pojmove na radnom komadu kada je proces rezanja započeo. Slika 22. prikazuje pojmove gotovog izrezanog radnog komada dok slika 23. prikazuje moguće rezove površine reznog komada.



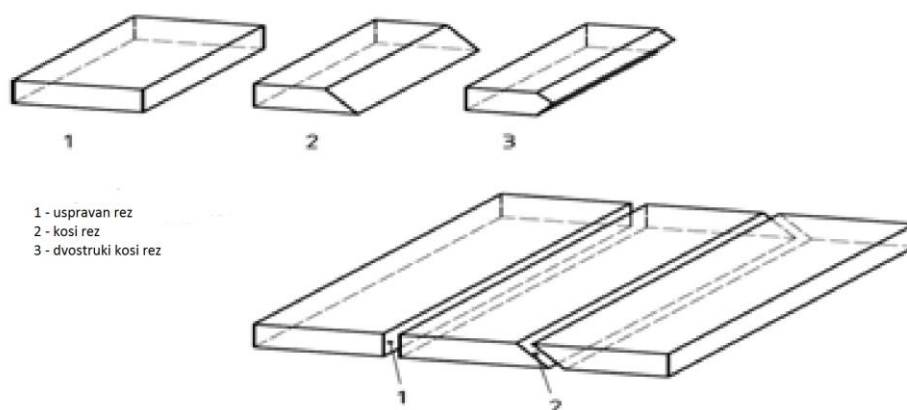
Slika 21. Proces rezanja radnog komada [10]

- 1 - gornji kut reza
2 - površina reza
3 - donji kut reza

- a - debljina radnog komada
b - debljina reza (prva mogućnost)
c - dubina lica korjena/debljina reza
d - debljina reza (druga mogućnost)
e - duljina reza



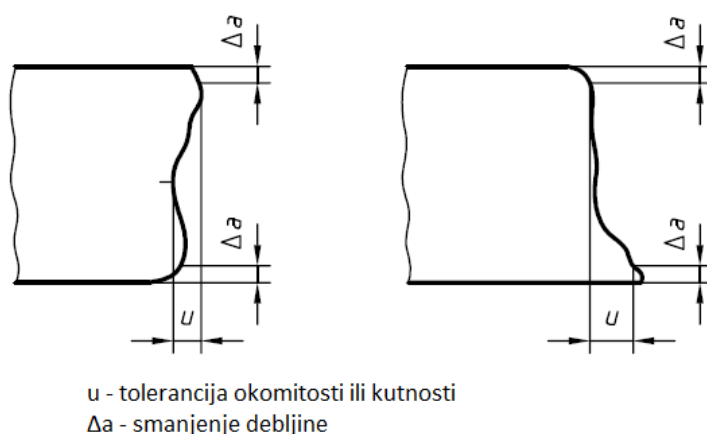
Slika 22. Radni komad po završetku rezanja [10]



Slika 23. Moguće vrste rezova [10]

2.4.2. Tolerancije okomitosti ili kutnosti

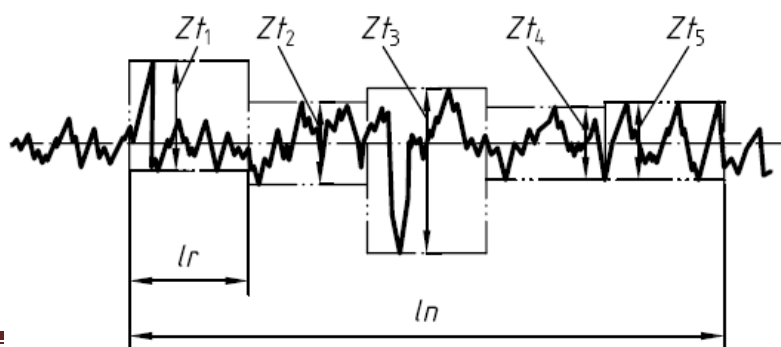
Tolerancija okomitosti ili kutnosti (u) definira se kao udaljenost između dvije paralelne uspravne linije (tangente) između kojih je opisan profil površine reza (Slika 24.) te mora biti unutar kuta namještanja (za okomite rezove unutar 90°).



Slika 24. Prikaz tolerancije okomitosti, vertikalni rez [10]

2.4.3. Prosječna visina neravnina

Prosječna visina neravnina (R_{Z5}) definirana je kao aritmetička sredina od pet pojedinačnih izmjerenih udaljenosti profila (Slika 25.). Indeks 5 u R_{Z5} dodan je kako bi se istaknula aritmetička sredina i maksimalna visina profila od pet pojedinačnih elemenata.



Zt1 – Zt5 - prosječne visine profila
 l_n - duljina mjerenja

Slika 25. Prosječna visina neravnina

2.4.4. Određivanje kvalitete površine

Navedeni zahtjevi u normi pokazuju procedure mjerenja kao i mjerne instrumente pomoću kojih je moguće odrediti i vrednovati karakteristične vrijednosti reznih površina. Prilikom izbora mjernih instrumenata mora se voditi računa da moguće greške ne prelaze 20% vrijednosti od karakterističnih vrijednosti koje trebaju biti izmjerene [20]. Tablice 5. i 6. pokazuju utjecaj kvalitete mjernih instrumenata na karakteristične vrijednosti reznih površina.

Tablica 5. Precizni mjerni instrumenti [10]

Oznaka	Granice greške	Primjeri
u	0,02	Vođenje uređaja u smjeru rezanja pod određenim kutem s mjernom urom Kut kontaktne točke igle $\leq 90^\circ$ Polumjer kontaktne točke igle $\leq 0,1$ mm
R_{Z5}	0,002	Točnost mjernog instrumenta, npr. električna kontaktna igla instrumenta za kontinuirano skeniranje u smjeru rezanja

Tablica 6. Hrapavi mjerni instrumenti [10]

Oznaka	Granice greške	Primjeri
u	0,1	Tro-kutnik (postoji mogućnost mjerenja pravog kuta prema tri površine u odnosu na kladu mjernog instrumenta), za kose rezove, za ovu namjenu koristi se i mjerni uređaj s točkom osjeta za mjerenje dubine
R_{Z5}	-	-

2.4.5. Uvjeti mjerenja

Mjerenje se vrši na izbrušenoj površini na kojoj nema tragova oksida te drugih nečistoća. Kao referentni element uzimaju se gornja i donja strana rezanog radnog komada.

Za definiranje ravnosti površine, referentni element i linija mjerenja trebale bi biti poravnate jedna u odnosu na drugu tako da je udaljenost među njima minimalna.

2.4.5.1. Točka mjerenja

Broj i mjesto mjerne točke ovisi o obliku i veličini radnog komada te bi trebale biti određene od strane operatera.

Broj mjerenja

Ako zahtjevi nisu određeni, treba voditi brigu o sljedećem:

u - dva puta po tri mjerenja na udaljenosti 20 mm svaki metar reza

R_{Z5} - jedanput jedno mjerenje svaki metar reza

Lokacije mjernih točki

Karakteristična vrijednost okomitosti ili kutnosti u bit će određena jedino u ograničenom području rezne površine. Prostor bi se trebao smanjivati dimenzijom Δa prema tablici 7. od gornjeg do donjeg reza površine kuta.

Razlog smanjenja profila reza je taljenje gornjeg ruba reza.

Tablica 7. Dimenzije Δa [10]

Debljina reza, a mm	Δa mm
≤ 3	0,1a
$>3 \leq 6$	0,3
$> 6 \leq 10$	0,6
$> 10 \leq 20$	1
$>20 \leq 40$	1,5
$>40 \leq 100$	2
$>100 \leq 150$	3
$>150 \leq 200$	5
$>200 \leq 250$	8
$>250 \leq 300$	10

Za debljine reza ispod 2 mm, procedura mjerenja tolerancija okomitosti ili kutnosti mora biti naknadno dogovorena.

Karakteristična vrijednost prosječne visine neravnina R_{Z5} može biti određena samo u graničnom području površine reza. Mjerenje se izvršava u točki maksimalne hrapavosti

površine debljine reza, u skladu s ISO 4288. Za plinsko rezanje kao i za plazma rezanje, mjerenja se uobičajeno izvršavaju na udaljenostima od oko 2/3 debljine reza od gornjeg ruba reza. Za debljine reza ispod 2 mm, mjerenje se izvršava na udaljenosti od oko 1/2 debljine reza od gornjeg ruba reza.

Prosječna visina neravnina R_{Z5} treba biti mjerena svakih 15 mm duljine reza u smjeru napredovanja rezanja.

2.4.6. Kvaliteta površine reza

Kvaliteta površina reza toplinski obradljivih reznih materijala opisana je slijedećim karakterističnim vrijednostima:

- a) tolerancija okomitosti ili kutnosti, u
- b) prosječna visina neravnina, R_{Z5} .

Mogu se također koristiti slijedeće karakteristične vrijednosti:

- c) rezna linija, n
- d) taljivi gornji rub, r
- e) mogući nastanak troske ili taljivih kapljica na donjem rubu reza.

2.4.6.1. Rasponi mjerenja

Za mjerenje kvalitete reza, rasponi tolerancija okomitosti ili kutnosti (u) i prosječne visine neravnina (R_{Z5}) trebaju biti naznačeni po redoslijedu u pa R_{Z5} . Gdje nije utvrđena vrijednost, treba biti naznačena nula (0).

Ukoliko se analizira lasersko rezanje, klasifikacija kvalitete je bazirana na rezultatima dobivenima na nelegiranim čelicima.

Pojedine greške, kao neizbježno stvaranje taljivih mjehura na donjem rubu reza, ili ostaci oksida na površini reza nisu uzimane u obzir pri definiranju vrijednosti kvalitete norme HRN EN ISO 9013-2003.

Rasponi, odnosno klase kvalitete za tolerancije okomitosti ili kutnosti prikazane su u tablici 8..

Tablica 8. Rasponi tolerancija okomitosti ili kutnosti, u [10]

Klasa	Tolerancije okomitosti ili kutnosti, u mm
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$

5	$1,2 + 0,035a$
---	----------------

Rasponi, odnosno klase kvalitete za prosječnu visinu neravnina R_{Z5} prikazane su u tablici 9..

Tablica 9. Rasponi prosječnih visina neravnina, R_{Z5} [10]

Klasa	Prosječna visina neravnina , R_{Z5} μm
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,2a \text{ mm})$

3. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu cilj je na dvama debljinama konstrukcijskog čelika različitim brzinama rezanja ustanoviti koja je brzina optimalna, tj. s kojom se brzinom dobiva najbolja kvaliteta reza. Uzorci su analizirani prema normi HR EN ISO 9013-2003.

3.1. Površine i njihov dodir

Prema definiciji, pod hrapavošću se podrazumijevaju nepravilnosti na površini koje su svojstvene postupku obradbe, ali koje ne uključuju valovitost, odstupanje od oblika i površinske pogreške. Potpuna informacija o stanju hrapavosti površine može se dobiti samo ako se mjernim postupkom uzimaju u obzir sva odstupanja koja predstavljaju hrapavost površine. Danas se hrapavost površine obično ocjenjuje preko jednodimenzionalnih parametara na osnovi dvodimenzionalnih profila površine. Izbor reprezentativnog dijela površine te način izbora profila, kao i parametara hrapavosti, definiran je normama. S referentne površine uzima se profil dobiven presijecanjem površine ravninom okomito postavljenom na smjer obradbe.

Na tako definiranom profilu određuju se parametri koji su prema normi iz 2002. godine (ISO 9013) sistematizirani i označeni određenim simbolima .

3.1.2. Definicije parametara hrapavosti

Termin tekstura površine odnosi se na fine nepravilnosti (brijegove i dolove) dobivene na površini nekog materijala. Prema dogovoru, tekstura se sastoji od dvije komponente: hrapavosti i valovitosti.

Hrapavost

Hrapavost površine je u općem smislu mikrogeometrijska nepravilnost površine koja nastaje tijekom postupaka obrade ili kao posljedica drugih utjecaja poput otapanja nakon izlaganja u aktivnom mediju. Hrapavost površine bitno utječe na svojstva materijala. Hrapavost uključuje kratkovalne nepravilnosti površine. Općenito je posljedica proizvodnog procesa. Prouzrokovana je metodom obrade, odnosno rezultat je postupka obrade površine, a ne stroja.

Uređaj za mjerenje hrapavosti površine (uređaji s ticalom)

Kod uređaja s ticalom, igla ticala pomiče se konstantnom brzinom po površini i vertikalni pomak igle pretvara u električni signal pomoću pretvornika. Električni je signal pojačan i obrađen pomoću računala. Skeniranjem od točke do točke, dobiva se kvantitativna informacija s obzirom na poziciju igle ticala. Uređajima s ticalom ostvaruju se vrlo precizna mjerenja, kako u laboratorijskim, tako i u industrijskim uvjetima s vertikalnim rasponom od nekoliko milimetara, s rezolucijom u nanometrima te s mogućnošću uzdužnog skeniranja preko 100 m.

U Laboratoriju za precizna mjerenja duljina (LFSB) ispitivani su sljedeći parametri: R_a , R_p , R_{Sm} , R_z , R_t , R_{Z1max} , na uređaju za ispitivanje hrapavosti površine Surtronic 25 (Tablica 10.) (Slika 26.).

Tablica 10. Specifikacija uređaja za mjerenje hrapavosti

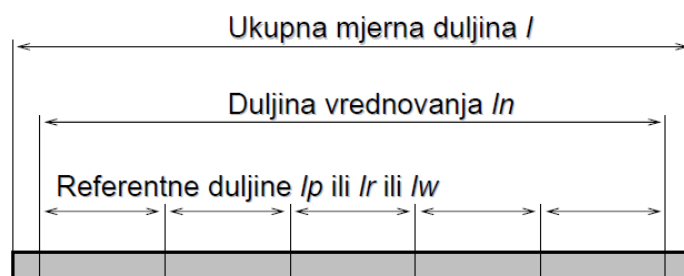
Elektroničko mehanički uređaj za ispitivanje hrapavosti površine	Surtronic 25
Proizvođač	Taylor Hobson
Serijska	MU 58-549



Slika 26. Uređaj za mjerenje hrapavosti SURTRONIC 25

Na slici 27. prikazan je 2D sustav ispitivanja hrapavosti površine koji prepoznaje tri karakteristične duljine:

- duljina ispitivanja (l_t)
- duljina vrednovanja (l_n)
- referentna duljina (l_r)



Slika 27. Prikaz tri karakteristične duljine [11]

Referentna duljina (l_r) je iznosom jednaka graničnoj vrijednosti filtra (λ_c) koja se dobiva prema tablici 11..

Tablica 11. Izbor granične vrijednosti filtra u ovisnosti o vrsti i vrijednosti profila [11]

Periodični profil	Neperiodični profil		Granična vrijednost filtra
R_{Sm} u mm	R_z u μm	R_a u μm	λ_c u mm
> 0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02	0,08
> 0,04 do 0,13	> 0,1 do 0,5	> 0,02 do 0,1	0,25
> 0,13 do 0,4	> 0,5 do 10	> 0,1 do 2	0,8
> 0,4 do 1,3	> 10 do 50	> 2 do 10	2,5
> 1,3 do 4	> 50	> 10	8

Parametri hrapavosti profila dijele se u četiri kategorije:

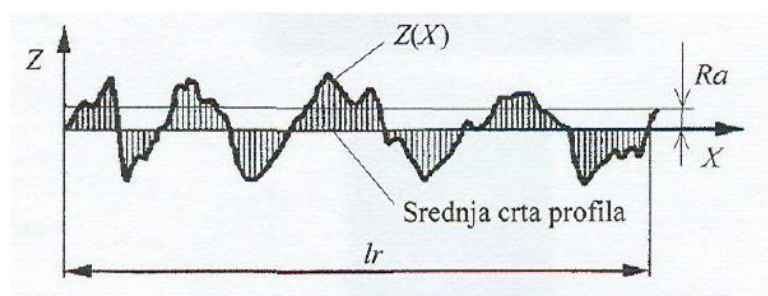
- amplitudni parametri (opisuju varijacije po visini profila)
- uzdužni paramatri (opisuju varijacije uzduž profila)
- hibridni parametri (opisuju varijacije iz kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila)

- krivuljni i srodni parametri (opisuju varijacije na krivuljama dobivenim iz uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila)

Parametri analizirani u eksperimentu:

Amplitudni parametri:

R_a je globalno priznati i najčešće korišten parametar hrapavosti. R_a predstavlja aritmetičku sredinu apsolutnih odstupanja profila hrapavosti od srednje linije (Slika 28.).



Slika 28. Prikaz aritmetičke sredine apsolutnih odstupanja profila (R_a) [11]

R_p predstavlja najveću visinu vrha profila, odnosno udaljenost između osi x i najviše točke vrha profila.

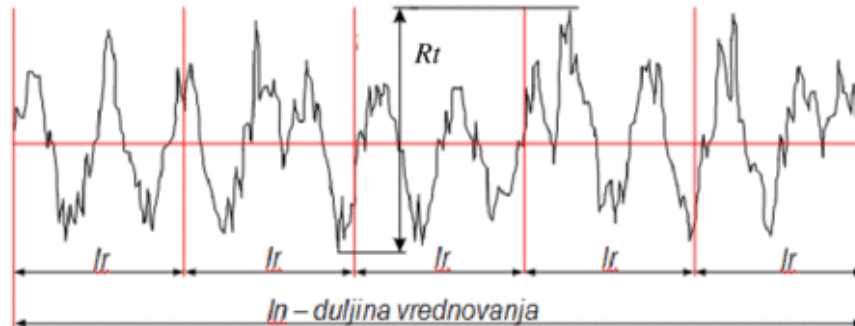
R_z je najveća visina profila unutar referentne duljine. Kada se analizira više od jedne referentne duljine R_z predstavlja srednju vrijednost pojedinih R_z unutar svake pojedine referentne duljine (Slika 29.).



Slika 29. Prikaz najveće visine profila unutar referentne duljine (R_z) [11]

R_{z1max} je najveća visina profila. Predstavlja najveću udaljenost vrha i dola unutar referentne duljine. Kada se analizira više od jedne referentne duljine R_{z1max} predstavlja najveći među pojedinačnim utvrđenim vrijednostima R_{z1max} .

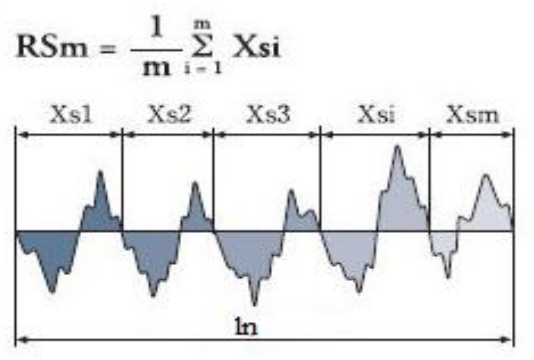
R_t predstavlja ukupnu visinu profila, odnosno zbroj najveće visine profila vrha R_p i najveće dubine dna profila R_v unutar duljine ocjenjivanja (Slika 30.).



Slika 30. Prikaz ukupne visine profila (R_t) [11]

Uzdužni parametri:

R_{Sm} je srednji razmak između vrhova profila na srednjoj liniji, mjereno unutar referentne duljine (vrh profila je najviša točka profila između rastućeg i padajućeg presjeka srednje linije) (Slika 31.).



Slika 31. Prikaz srednjeg razmaka između vrhova profila (R_{Sm}) [11]

Dodatni parametri mogu se analizirati korištenjem odgovarajućeg software-a.

3.2. Oprema za rezanje

IZVOR STRUJE

Sustav za plazma rezanje nalazi se u Laboratoriju za zavarivanje na FSBu (Slika 32.). Za rezanje plazmom koristi se izvor za visokoprecizna toplinska rezanja, SPARCIN 900M, proizvođača SPT Plasmatechnik AB. Metali debljine od 1 do 20 mm mogu se rezati sa strujama od 20 do 120A, s intermitencijom 100%. Tanki limovi do 8 mm debljine mogu se rezati vrlo precizno u "high definition" klasi, dok je maksimalna debljina rezanja 28 mm. Plazma sustav koristi tehničke plinove, kisik, dušik, argon, vodik i njihove mješavine, što daje optimalne rezultate kod svih vrsta metala. Također je moguće koristiti zrak. Izvor je konstruiran s inverterskom tehnologijom i ima jedinstvene mogućnosti integriranja s robotiziranim i vrhunskim cnc sustavima. Upravljanje i kontrola glavnog luka, pilot luka, napona luka i struje rezanja izvodi se automatski, što omogućuje održavanje konstantne kvalitete reza.



Slika 32. Izvor struje SPARCIN 900M

CNC STOL

Vođenje rezne glave lasera i plazma pištolja izvodi troosni pozicioni CNC sustav-stol, PROXIMA KOMPAKT 10/20 proizvođača VANAD (Slika 33.). PROXIMA KOMPAKT 10/20 je portalna rezačica s dvostranim sinkroniziranim pogonom, s tri pogonska servo motora. Dvostrani sinkronizirani pogon omogućava visoku točnost rezanja, dulji vijek trajanja i vrlo malo odstupanje od idealne geometrije rezanja. Maksimalna brzina pozicioniranja i rezanja iznosi 20 m/min. Radno područje stola iznosi 1050 x 2200 mm. Rezolucija iznosi 0,01 mm, a točnost ponavljanja i pozicioniranja iznosi $\pm 0,05$ mm. Za izvođenje vertikalnog gibanja brzinom do 8 m/min, postoje dvije Z osi, jedna za lasersku glavu, a druga za plazma pištolj. Svaka Z os opremljena je senzorikom za automatsko održavanje udaljenosti između sapnice i lima, s točnošću $\pm 0,15$ mm. S donje strane stola nalazi se segmentni odsis plinova pomoću filterskog sustava IPERJET. [12]



Slika 33. CNC sustav – stol PROXIMA KOMPAKT

CNC UPRAVLJANJE

Velikim brzinama i dinamičkim karakteristikama stola upravlja suvremeni kontrolni CNC sustav VANAD-MEFI. To je dvostruki 867 upravljački sustav s dva Intel procesora i zajedničkom sabirnicom. Kontrolni sustav osigurava optimalne tehničke parametre, kao i visoku točnost, preciznost i dinamiku prilikom promjene smjera ili brzine rezanja. Navedeni kontroler namjenjen je za upravljanje i kontrolu laserskih rezačica, a može se koristiti i kod

visokopreciznih plazma rezačica. Visoka produktivnost rezanja podržana je značajno reduciranim vremenom podizanja obradne glave, te ubrzanim namještanjem početne visine bušenja što povećava produktivnost približno 30% u odnosu na klasične tipove upravljanja plazma pištoljem. Posebno je važno upravljanje na početku i kraju rezanja, posebno kod unutarnjih kontura, te upravljanje gibanjem po kutevima. Prihvat plazma pištolja i laserske glave izveden je sa zaštitom od kolizije, kako ne bi došlo do oštećenja u slučaju udara u radni komad. [12]

3.3. Materijal

Radni materijal je opći konstrukcijski čelik oznake S355JR. Konstrukcijski čelik je ugljični čelik (obični ili plemeniti) s masenim udjelom ugljika manjim od 0,6% ili legirani čelik (uglavnom s manganom, silicijem, kromom, niklom, volframom). Čelik S355JR pripada skupini nelegiranih konstrukcijskih čelika, a kemijski sastav čelika prikazan je u tablici 12.. Jedna od važnih tehnoloških svojstava čelika S355JR je dobra zavarljivost, dok od ostalih traženih svojstava treba spomenuti hladnu oblikovljivost, prikladnost za savijanje, duboko vučenje, kovanje, rezljivost...

To su nelegirani čelici s feritno – perlitnom mikrostrukturom. Zrno će biti sitnije ako je čelik nakon toplog oblikovanja normaliziran. Sitnozrnatost se poboljšava posebnim smirivanjem uz dodatak aluminija koji stvara aluminijev nitrid (AlN) i sprječava rast zrna pri kasnijim zagrijavanjima.

Tablica 12. Kemijski sastav čelika S355JR [13]

C	Si	Mn	P	S	N	Cu	C _E
0,240	0,550	1,600	0,04	0,04	0,012	0,550	0,470

C_E predstavlja ekvivalent ugljika, a dobiven je formulom:

$$C_E = C + Mn / 6 + (Cr + Mo + V) / 5 + (Cu + Ni) / 15 \quad [13]$$

U eksperimentu je korišten S355JR debljine 5 mm i 10 mm.

3.4. Plan pokusa

U cilju određivanja kvalitete reza za odabrani radni materijal, odlučeno je da se u eksperimentu varira debljinom radnog materijala te se za svaku debljinu mijenja (povećava) brzina rezanja. Slijedi analiza kvalitete hrapavosti površine reza kako bi se odredila optimalna brzina kod koje dolazi do najbolje kvalitete reza. Definirana je gornja granica, odnosno

granica brzine rezanja kod koje više ne dolazi do probijanja radnog komada. Brzina rezanja mijenjana je ovisno o debljini radnog komada, za konstrukcijski čelik debljine 5 mm korakom od 0,3 m/min, od 1,2 m/min pa naviše. Za konstrukcijski čelik debljine 10 mm korakom od 0,2 m/min, od 0,5 m/min pa naviše. Oznake uzoraka kao i parametri rezanja definirani su u tablici 13.

Tablica 13. Plan pokusa

Uzorak	Debljina materijala (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Vrsta plazmenog plina
a1	10	0,5	Zrak
a2		0,7	
a3		0,9	
a4		1,1	
a5		1,3	
b1	5	1,2	
b2		1,5	
b3		1,8	
b4		2,1	
b5		2,4	
b6		2,7	
b7		3	

Nakon plazma rezanja obavlja se čišćenje uzoraka te se pristupa određivanju kvalitete reza. Od značajki kvalitete reza ispitivana je hrapavost površine te tolerancija okomitosti ili kutnosti.

3.4.1. Plazma rezanje konstrukcijskog čelika debljine 10 mm






Uzorci su izrezani u Laboratoriju za zavarivanje FSB-a prema planu pokusa, različitim brzinama rezanja kako bi se analizirao utjecaj brzine rezanja na samu kvalitetu površine reza. Ostali parametri procesa rezanja su držani konstantnima. Tablica 14. prikazuje parametre rezanja konstrukcijskog čelika zrakom kao plazmenim plinom.

Tablica 14. Parametri rezanja konstrukcijskog čelika 10 mm debljine

Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Udaljenost sapnice od radnog komada (mm)	Struja rezanja (A)
a1	Zrak	1,1	0,5	5	80
a2			0,7		
a3			0,9		
a4			1,1		
a5			1,3		

Tijekom izvršenja plana pokusa rezanja konstrukcijskog čelika debljine 10 mm, pri brzinama rezanja od 0,5 do 0,9 m/min došlo je do potpunog rezanja materijala. Pri brzini od 1,1 m/min je došlo do nepotpunog probijanja plazmenog mlaza po cijeloj dubini te je izvršen ponovni prolaz. Na brzini od 1,3 m/min dolazi do neprobijanja površine po cijeloj debljini radnog komada te je na taj način određena gornja granica brzine rezanja. Stoga, za odabir optimalnih parametara rezanja konstrukcijskog čelika dolaze u obzir samo brzine pri kojima je ostvareno potpuno rezanje materijala. Izbor od četiri uzorka zbog opsega ispitivanja sužen je na tri najzanimljivija (a1, a3, a4) te su te površine reza uzoraka ispitane i klasificirane u skladu s normom HRN EN ISO 9013. Tablica 15. prikazuje slike uzoraka nakon rezanja.

Tablica 15. Uzorci nakon rezanja (debljina 10 mm)

Smjer rezanja		
Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Konstantni parametri: plin-zrak, promjer sapnice -1,1 mm, udaljenost sapnice od radnog materijala – 5 mm , struja rezanja -80 A
a1	0,5	
a2	0,7	
a3	0,9	
a4	1,1	

3.4.1.1. Mjerenje hrapavosti površine reza konstrukcijskog čelika (debljina 10 mm)

Osim R_Z – prosječna visina neravnina, koja je definirana u navedenoj normi HRN EN ISO 9013, pomoću elektroničko mehaničkog uređaja za ispitivanje hrapavosti površine, SURTRONIC 25 izmjerene su i sljedeće veličine:

- R_a - srednje aritmetičko odstupanje profila hrapavosti (amplitudni parametar),
- R_p - najveća visina ispupčenja profila hrapavosti(amplitudni parametar),
- R_t - ukupna visina profila (amplitudni parametar),
- R_{Z1max} - najveća visina profila hrapavosti (amplitudni parametar),
- R_{Sm} - srednji korak elemenata profila (uzdužni parametar)

U laboratoriju za precizna mjerenja (LFSB) obavljeno je mjerenje hrapavosti površine reza konstrukcijskog čelika debljine 10 mm i to na rezovima kod kojih je došlo do potpunog probijanja materijala po cijeloj debljini (Slika 34.). Od ukupno 4 reza, za analizu kvalitete reza odabrana su tri najzanimljivija zbog opsega mjerenja i to redom: a1, a3 i a4.



Slika 34. Mjerenje hrapavosti na uzorcima

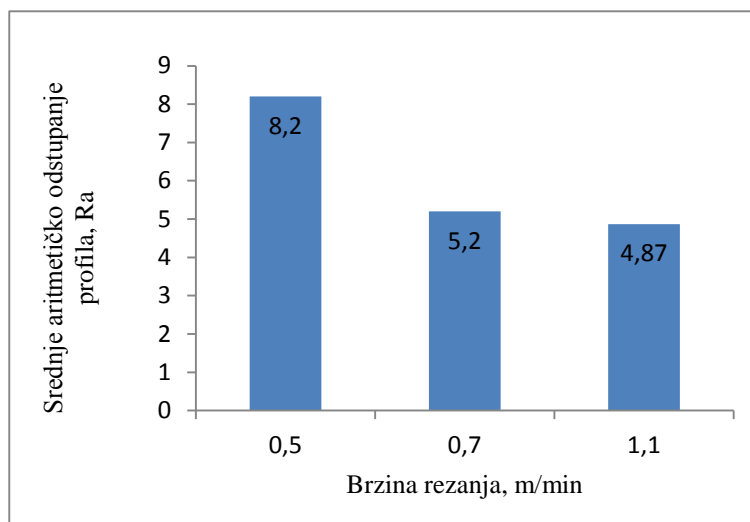
Obavljena su po tri mjerenja na svakom rezu te su nakon toga određene srednje vrijednosti navedenih veličina hrapavosti površine (X), standardne devijacije (S), rasponi (R) te minimumi i maksimumi izmjerenih veličina. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 16..

Tablica 16. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza (debljina 10 mm)

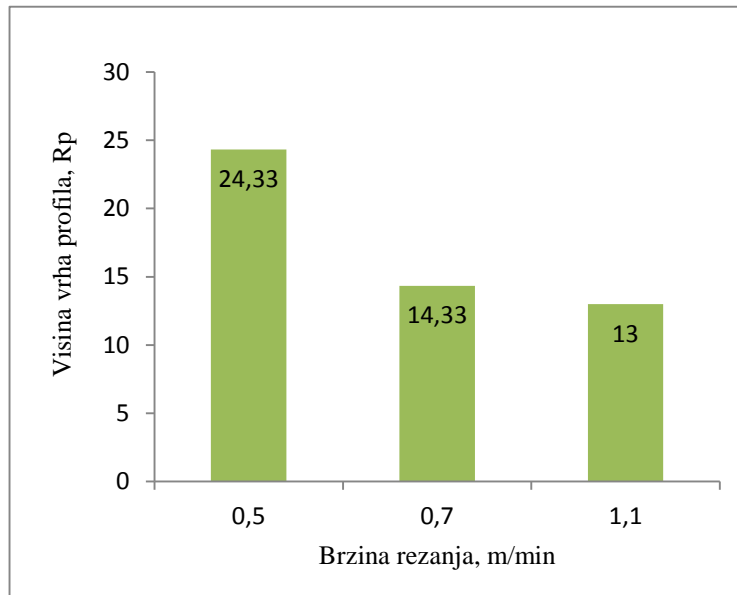
Uzorak broj 1 (debljina = 10 mm, brzina rezanja = 0,5 m/min)					
Veličina hrapavosti (μm)	X- srednja vrijednost	s- standarna devijacija	R-raspon	Max	Min
R_a	8,2	0,566	1,2	9	7,8
R_z	46,33	3,299	8	50	42
R_p	24,33	0,943	2	25	23
R_t	63,33	4,028	9	69	60
R_{Sm}	208	12,569	30	225	195
R_{z1max}	59,67	1,247	3	61	58
Uzorak broj 3 (debljina = 10 mm, brzina rezanja = 0,9 m/min)					
Veličina hrapavosti (μm)	X- srednja vrijednost	s- standarna devijacija	R-raspon	Max	Min

R_a	5,2	1,019	2,4	6,2	3,8
R_z	28	4,967	11	32	21
R_p	14,33	4,189	10	20	10
R_t	40,33	9,568	22	49	27
R_{Sm}	227,67	40,844	99	273	174
R_{z1max}	38	9,416	13	49	26
Uzorak broj 4 (debljina = 10 mm, brzina rezanja = 1,1 m/min)					
Veličina hrapavosti (μm)	X- srednja vrijednost	s- standardna devijacija	R-raspon	Max	Min
R_a	4,87	1,268	3	6,6	3,6
R_z	25,67	2,867	7	29	22
R_p	13	0,816	2	14	12
R_t	33,67	18,006	8	38	30
R_{Sm}	242,33	64,158	139	333	194
R_{z1max}	32,67	17,518	9	37	28

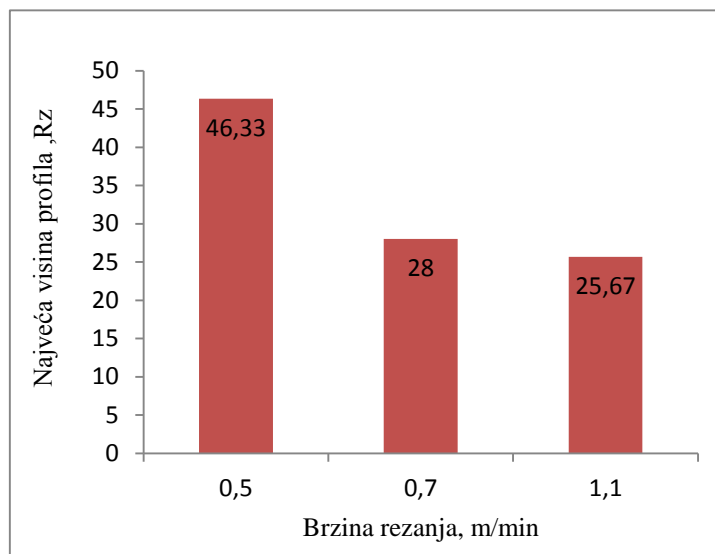
Prema normi HRN EN ISO 9013 klasificirana je hrapavost površine, odnosno prosječna visina neravnina – R_z . Iz datih rezultata prosječnih visina neravnina uzoraka, vidljivo je da su se rezanjem postigle dobre klase kvalitete hrapavosti površine. Svi ispitivani uzorci pripadaju drugoj klasi, prema tablici 9.. Najmanje veličine hrapavosti površine dobivene su na uzorku a3 s brzinom rezanja od 1,1 m/min, izuzev veličine hrapavosti R_{Sm} . Na slikama 35. do 40., prikazane su vrijednosti veličina hrapavosti ispitivanih uzoraka te njihova promjena u ovisnosti o brzini rezanja.



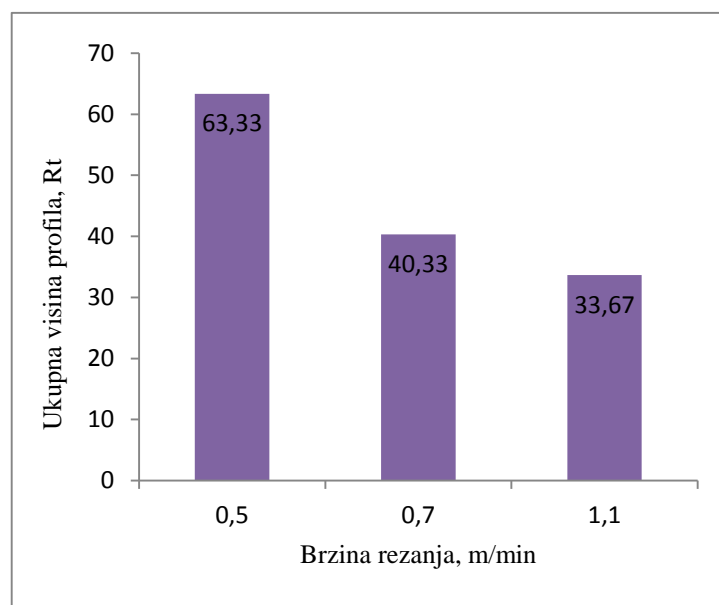
Slika 35. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja profila (Ra) i brzine rezanja (debljina 10 mm)



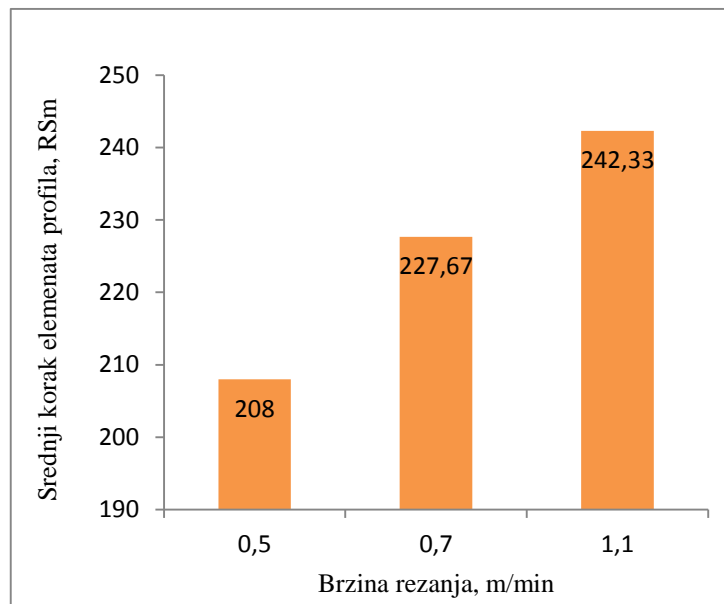
Slika 36. Prikaz ovisnosti visine vrha profila (Rp) i brzine rezanja (debljina 10 mm)



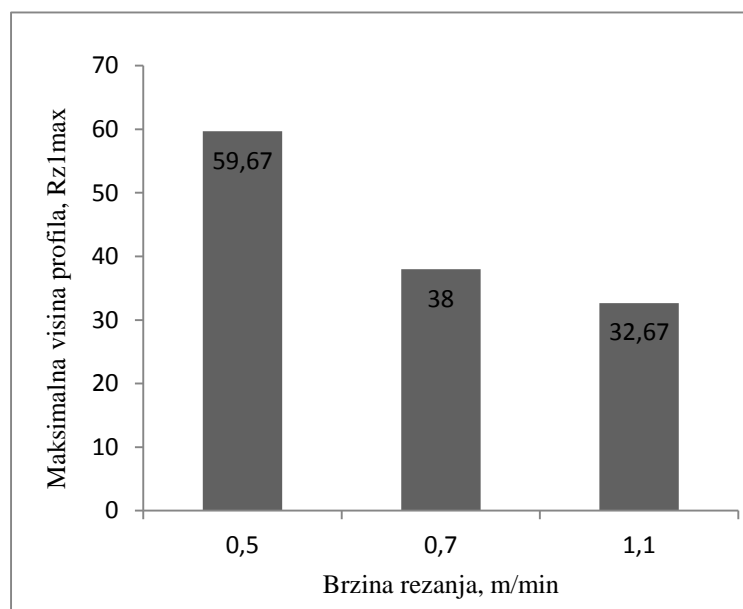
Slika 37. Prikaz ovisnosti najveće visine profila (Rz) i brzine rezanja (debljina 10 mm)



Slika 38. Prikaz ovisnosti ukupne visine profila (Rt) i brzine rezanja (debljina 10 mm)



Slika 39. Prikaz ovisnosti srednjeg koraka elementa profila (R_{Sm}) i brzine rezanja (debljina 10 mm)



Slika 40. Prikaz ovisnosti maksimalne visine profila (R_{z1max}) i brzine rezanja (debljina 10 mm)

3.4.1.2. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza konstrukcijskog čelika (debljina 10 mm)

Također u Laboratoriju za precizna mjerenja (LFSB) mjerena je i značajka kvalitete reza - okomitost ili kutnost reza. Okomitost reza od gornje do donje površine radnog materijala točno pod 90° označava da je nagib reza jednak nuli. Udaljenost sapnice može znatno utjecati na nagib reza, manja udaljenost znači i manji nagib reza. Pomoću univerzalnog mjernog mikroskopa (Slika 41.) izmjerena je tolerancija okomitosti ili kutnosti na način da su izabrana dva najveća odstupanja od referentne nule s gornje i donje strane. Mjerenje je napravljeno na uzorku broj a3 jer je ono imalo najnižu veličinu hrapavosti R_z . Izmjerena tolerancija okomitosti klasificirana je prema normi HRN EN ISO 9013.



Slika 41. Uređaj za mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti

Za uzorak broj 3 (brzina rezanja = 0,9 m/min) dobivena je kutnost, $u=0,420$ mm te prema normi HRN EN ISO 9013 pripada u treću klasu odstupanja prema okomitosti ili kutnosti (Tablica 8.).

3.4.2. Plazma rezanje konstrukcijskog čelika debljine 5 mm







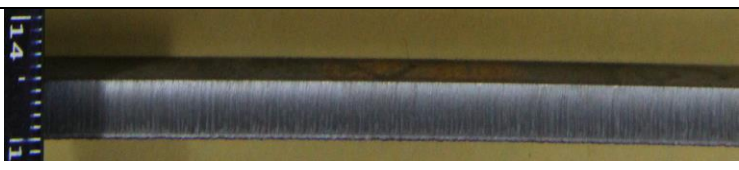

Uzorci debljine 5 mm također su izrezani u Laboratoriju za zavarivanje FSB-a prema planu pokusa, različitim brzinama rezanja kako bi se analizirao utjecaj brzine rezanja na samu kvalitetu površine reza. Ostali parametri procesa rezanja su držani konstantnima. Tablica 17. prikazuje parametre rezanja konstrukcijskog čelika debljine 5 mm.

Tablica 17. Parametri rezanja konstrukcijskog čelika debljine 5 mm

Uzorak	Plin	Promjer sapnice, ϕ (mm)	Brzina rezanja (m/min)	Udaljenost sapnice od radnog komada (mm)	Struja rezanja (A)
1.	Zrak	1,1	1,2	5	80
2.			1,5		
3.			1,8		
4.			2,1		
5.			2,4		
6.			2,7		
7.			3		

Tijekom izvršenja plana pokusa rezanja konstrukcijskog čelika debljine 5 mm, pri brzinama rezanja od 1,2 do 3 m/min došlo je do potpunog rezanja materijala (Tablica 18.). Povišenje brzine preko 3 m/min nije bilo ostvarivo zbog ograničenja CNC sustava VANAD-MEFI. Za odabir optimalnih parametara rezanja konstrukcijskog čelika dolaze u obzir samo brzine pri kojima je ostvareno potpuno rezanje materijala, u ovom slučaju u obzir dolaze svi uzorci, ali izbor od sedam uzoraka zbog opsega ispitivanja sužen je na tri najzanimljivija (b1, b3, b7) te su te površine reza uzoraka ispitane i klasificirane u skladu s normom HRN EN ISO 9013.

Tablica 18. Uzorci nakon rezanja (debljina 5 mm)

Smjer rezanja		
Uzorak	Brzina rezanja (m/min)	Konstantni parametri: plin-zrak, promjer sapnice -1,1 mm, udaljenost sapnice od radnog materijala – 5 mm , struja rezanja -80 A
b1	1,2	
b2	1,5	
b3	1,8	
b4	2,1	
b5	2,4	
b6	2,7	
b7	3	

3.4.2.1. Mjerenje hrapavosti površine reza konstrukcijskog čelika (debljina 5 mm)

Mjerenje hrapavosti reza konstrukcijskog čelika debljine 5 mm provedeno je na isti način kako je prethodno i opisano za konstrukcijski čelik debljine 10 mm.

U laboratoriju za precizna mjerenja (LFSB), uređajem Surtronic 25 obavljeno je mjerenje hrapavosti površine reza konstrukcijskog čelika debljine 5 mm i to na rezovima kod kojih je došlo do potpunog probijanja materijala po cijeloj debljini. Od ukupno 7 uzoraka, za analizu kvalitete reza odabrana su tri i to redom: b1, b3, b7.

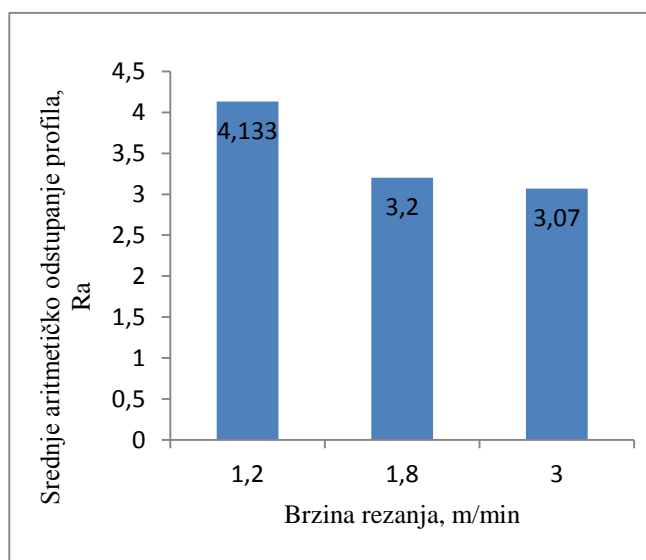
Obavljena su po tri mjerenja na svakom rezu te su nakon toga određene srednje vrijednosti navedenih veličina hrapavosti površine (X), standardne devijacije (S), rasponi (R) te minimumi i maksimumi izmjerenih veličina. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 19..

Tablica 19. Izmjerene vrijednosti hrapavosti površine reza (debljina 5 mm)

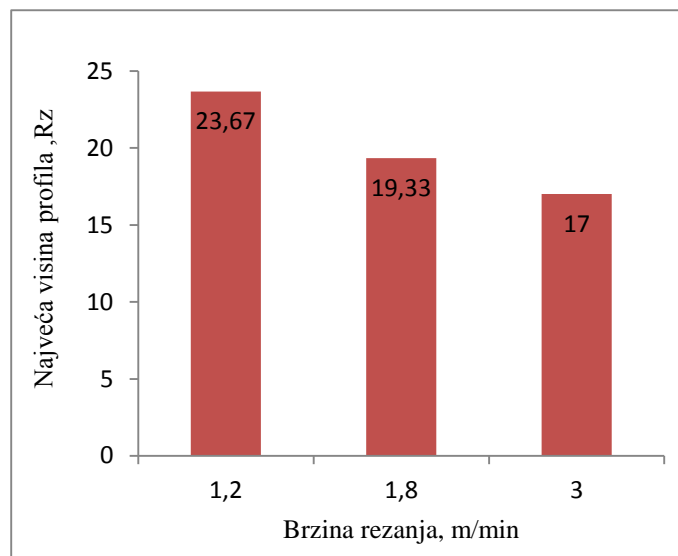
Uzorak broj 1 (debljina = 5 mm, brzina rezanja = 1,2 m/min)					
Veličina hrapavosti (μm)	X- srednja vrijednost	s- standardna devijacija	R-raspon	Max	Min
R_a	4,133	0,471	1	4,8	3,8
R_z	23,67	1,885	4	25	21
R_p	13,67	2,055	5	16	11
R_t	35,33	6,944	17	44	27
R_{Sm}	235,67	41,684	102	288	186
R_{z1max}	33,67	8,179	20	44	24
Uzorak broj 3 (debljina = 5 mm, brzina rezanja = 1,8 m/min)					
Veličina hrapavosti (μm)	X- srednja vrijednost	s- standardna devijacija	R-raspon	Max	Min
R_a	3,2	0,327	0,8	3,6	2,8
R_z	19,33	3,399	8	24	16
R_p	9,67	1,699	4	12	8
R_t	24	4,32	10	30	20
R_{Sm}	173,33	38,309	92	214	122

R_{Z1max}	22,33	3,299	7	27	20
Uzorak broj 7 (debljina = 5 mm, brzina rezanja = 3 m/min)					
Veličina hrapavosti (μm)	X- srednja vrijednost	s- strandardna devijacija	R-raspon	Max	Min
R_a	3,07	0,249	0,6	3,4	2,8
R_z	17	0,816	2	18	16
R_p	9,67	0,943	2	11	9
R_t	21,67	1,886	4	23	19
R_{Sm}	262,33	4,497	10	266	256
R_{Z1max}	21	2,16	5	23	18

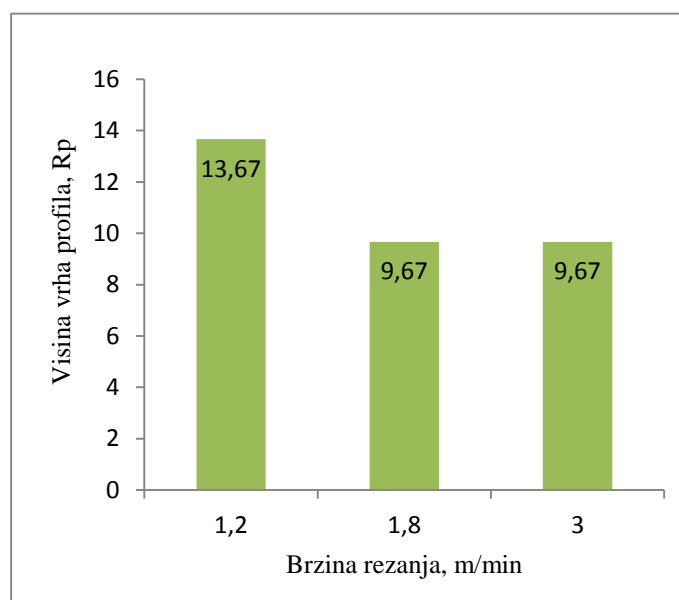
Prema normi HRN EN ISO 9013 klasificirana je hrapavost površine, odnosno prosječna visina neravnina – R_z . Iz datih rezultata prosječnih visina neravnina uzoraka, vidljivo je da su se rezanjem postigle dobre klase kvalitete hrapavosti površine. Svi ispitivani uzorci pripadaju drugoj klasi (Tablica 9.). Najmanja hrapavost dobivena je na uzorku b3 brzinom rezanja od 3 m/min, izuzev veličine hrapavosti R_{Sm} . Na slikama 42. do 47., prikazane su vrijednosti veličina hrapavosti ispitivanih uzoraka te njihova promjena u ovisnosti o brzini rezanja.



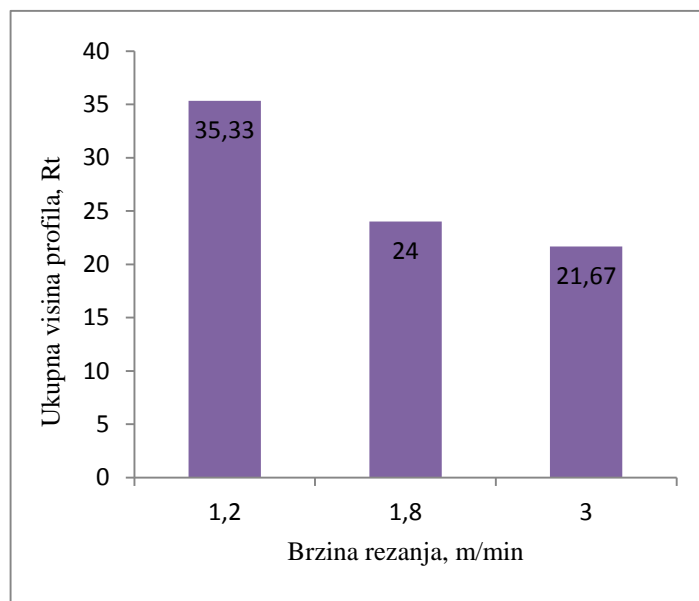
Slika 42. Prikaz ovisnosti srednjeg aritmetičkog odstupanja (R_a) i brzine rezanja (debljina 5 mm)



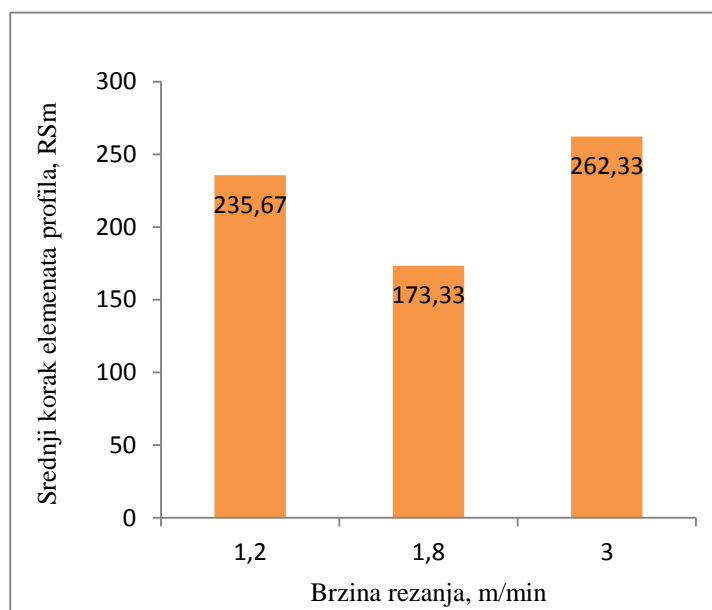
Slika 43. Prikaz ovisnosti najveće visine profila (R_z) i brzine rezanja (debljina 5 mm)



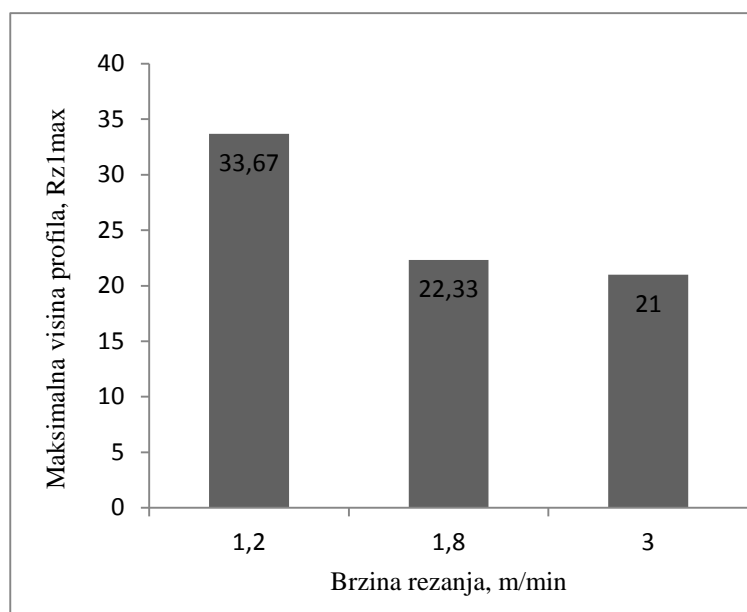
Slika 44. Prikaz ovisnosti visine vrha profila (R_p) i brzine rezanja (debljina 5 mm)



Slika 45. Prikaz ovisnosti ukupne visine profila (R_t) i brzine rezanja (debljina 5 mm)



Slika 46. Prikaz ovisnosti srednjeg koraka elemenata profila (R_{Sm}) i brzine rezanja (debljina 5 mm)



Slika 47. Prikaz ovisnosti maksimalne visine profila (Rz_{1max}) i brzine rezanja (debljina 5 mm)

3.4.2.2. Mjerenje tolerancije okomitosti ili kutnosti reza konstrukcijskog čelika (debljina 5 mm)

U laboratoriju za precizna mjerenja (LFSB) mjerena je značajka kvalitete reza - okomitost reza i za konstrukcijski čelik debljine 5 mm. Okomitost reza od gornje do donje površine radnog materijala točno pod 90° označava da je nagib reza jednak nuli. Udaljenost sapnice može znatno utjecati na nagib reza, manja udaljenost znači i manji nagib reza. Pomoću univerzalnog mjernog mikroskopa izmjerena je tolerancija okomitnosti ili kutnosti na način da su izabrana dva najveća odstupanja od referentne nule s gornje i donje strane. Mjerenje je napravljeno na uzorku b3. Izmjerena tolerancija okomitosti klasificirana je prema normi HRN EN ISO 9013.

Za uzorak broj 3 (brzina rezanja = 1,8 m/min) dobivena je kutnost, $u=0,2229$ mm te prema normi HRN EN ISO 9013 pripada u treću klasu odstupanja prema okomitosti ili kutnosti (Tablica 8.).

4. ZAKLJUČAK

Plazma rezanje jedno je od najčešće korištenih toplinskih postupaka rezanja. Pri rezanju plazmom visoka temperatura plazmenog mlaza tali radni predmet, a taljevina se otpuhuje iz reza kinetičkom energijom plina, koji izlazi iz mlaznice. Za rezanje se najčešće koristi proces s prenosivim lukom, kojim se mogu rezati svi elektroprovodljivi materijali. Plazma rezanje se odlikuje velikim brzinama rezanja i uglavnom se koristi u mehaniziranim sustavima.

Cilj ovog rada bio je odrediti optimalnu brzinu rezanja za zadani konstrukcijski čelik S355JR na dvijema debljinama, od 5 mm i 10 mm, te temeljem norme HRN EN ISO 9013-2003 odrediti kvalitetu reza mjerenjem i analiziranjem veličina hrapavosti (R_a , R_z , R_p , R_t , R_{Sm} i R_{Z1max}) i tolerancije okomitosti (u).

Analizom površine rezova uočeno je da premala ili prevelika brzina rezanja ima za rezultat jako lošu kvalitetu reza. Srh koji nastaje kao produkt prevelike brzine rezanja teško je ukloniti, te zahtijeva naknadno brušenje. Ako je brzina rezanja prevelika može doći i do toga da plazmeni mlaz ne penetrira potpuno kroz materijal. Ako je brzina rezanja premala, širina reza će biti veća, a rastaljeni materijal neće biti ispuhan plinom nego će se nakupljati na dnu reza kao srh koji je lako ukloniti za razliku od srha koji nastaje kod prevelike brzine rezanja.

Iz datih prosječnih rezultata R_z , uz konstantne ostale parametre, vidljivo je da je optimalna brzina rezanja za konstrukcijski čelik debljine 5 mm 3 m/min (uzorak b7), a za debljinu 10 mm optimalna brzina rezanja iznosi 1,1 m/min (uzorak a4). Postignute su dobre klase kvalitete hrapavosti te svi uzorci pripadaju drugoj klasi hrapavosti površine. Uzorci dati na analizu tolerancije okomitosti (a3 i b3) pripadaju trećoj klasi okomitosti.

Poboljšana kvaliteta reza navedenog konstrukcijskog čelika dobila bi se daljnjom optimizacijom parametara rezanja.

5. LITERATURA

- [1] I. Samardžić – Rezanje plazmom, predavanja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu.
- [2] Mechanical English article, Plasma Arc Welding,
http://www.mapeng.net/news/mechanical_English_article/2013/7/mapeng_137312244159721.html (10.02.2016.)
- [3] LINCOLN ELECTRIC, The welding experts, How a plasma cutter works,
<http://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/plasma-cutters/process-and-theory/Pages/how-a-plasma-cutter-works.aspx> (13.02.2016.)
- [4] SPT Plasmatechnik AB, catalog
http://www.weldcom.ru/catalog/spt_plasmatechnik_ab/ustanovki_dlya_mehanizirovannoi_vozdushnoplazmennoi_rezki/sparcin_9m_and_900m/ (13.02.2016.)
- [5] V. Singh: Analysis of process parameters of plasma arc cutting using design of experiment, članak, 2011.
- [6] M.Milotić: Priručnik za zavarivače , 2.dopunjeno izdanje, 2008.
- [7] V.Panić: 3D Robotizirano rezanje plazma postupkom, članak, SERVUS d.o.o.
- [8] Katalog tehnika rezanja, Varstroj, 2012.
- [9] Marta Harničárová, Jan Valíček, Jozef Zajac, Sergej Hloch, Robert Čep, Ivana Džubáková, Szymon Tofil, Petr Hlaváček, Jiří Klich, Lenka Čepová: TECHNO-ECONOMICAL COMPARISON OF CUTTING MATERIAL BY LASER, PLASMA AND OXYGEN, članak, Tehnički vjesnik 19, 2012.
- [10] HRN EN ISO 9013:2003
- [11] Osnove strojarskih konstrukcija,
http://www.fsb.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf
- [12] S.Kralj, Z.Kožuh, I.Garašić : Strojevi i oprema za zavarivanje, 2003.

[13] European Steel and Alloy Grades /Numbers,

http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=8 (18.02.2016.)

